



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ NA MĚŘENÍ PEVNOSTI PÁJENÉHO SPOJE

TEST EQUIPMENT FOR SOLDER JOINT STRENGTH MEASURING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Čechák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Starý, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Ondřej Čechák

ID: 173630

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Zkušební zařízení na měření pevnosti pájeného spoje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku týkající se pevnosti pájeného spoje a měření pevnosti u zástrčné i povrchové montáže součástek.

Návrhněte konstrukční zdokonalení manuálního zkušebního zařízení. Soustředte se zejména na motorický posuv v z-ové ose. Minimální rozsah požadované rychlosti motorizovaného posuvu v z-ové ose je 0,5 mm/s - 4 mm/s.

Prakticky realizujte programovatelný posuv v z-ose u zařízení typu MARK M-10.

Proveďte kalkulaci dosažených nákladů a technicky i ekonomicky porovnejte vaše řešení s originálním motorickým posuvem v z-ové ose.

Realizujte zkušební testy pevnosti zapájených ev. i přilepených součástek a vyhodnoťte dosažené výsledky.

Navrhnete implementaci zařízení na měření pevnosti pájeného spoje do programu laboratorní výuky předmětu MMOT.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 21.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práce seznamuje s problematikou pevnosti pájeného spoje a souvisejících matematických vztahů a využití této problematiky v technologii trhacích strojů na měření pevnosti pájeného spoje. Vysvětluje důležitost a důvody použití této technologie. Důraz je poté kladen na návrh a konstrukci inovací stávajícího laboratorního manuálního trhacího měřicího systému, jeho poloautomatizaci a možné využití tohoto inovovaného systému v laboratorním cvičení předmětu na FEKT VUT.

KLÍČOVÁ SLOVA

pevnost, pájený spoj, SMD, THT, trhací stroj, lineární aktuátor, testovací zařízení

ABSTRACT

This master thesis introduces the problematics of the tensile strength of soldered joints and the correlative mathematical formulas and the use of mentioned problematics in the technology of die shear/pull machines designed for the solder joint tensile strength measurement. It explains the importance and reasons for the use of this technology. The emphasis is then laid on the design and construction innovations of the current laboratory manual shear/pull measuring machine, its semi-automation and the possibility of utilizing the innovated system in a laboratory class of a subject on FEEC BUT.

KEYWORDS

strength, soldered joint, SMD, THT, shear/pull machine, linear actuator, test equipment

ČECHÁK, O., *Zkušební zařízení na měření pevnosti pájeného spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2019. 74 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Rovněž děkuji Bc. Jaroslavu Dohnalovi za odborné posouzení řešení elektrického návrhu zařízení, Bc. Michaelu Velímovi za pomoc se zprostředkováním vzorků, pracovníkům strojírenské dílny Fakulty Strojního Inženýrství VUT v Brně za jejich služby, pracovníkům oddělení technologií firmy TESCAN Brno s.r.o. za odborné rady, Ing. Martinu Adámkovi Ph.D. za poskytnutí a zaučení na pracovišti přístroje DAGE PC2400, Elišce Holubníčkové za trpělivost a emocionální a psychickou podporu a v neposlední řadě své rodině za finanční podporu v průběhu studia.

V Brně dne: 21. května 2019

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	7
Teoretická část	8
1 Spolehlivost pájeného spoje	8
1.1 Mechanické namáhání pájeného spoje	8
1.2 Vlastnosti pájeného spoje ve střihu (shear) a v tahu (pull).....	8
1.2.1 Meze mechanického namáhání materiálu	9
1.3 Pevnost pájeného spoje	10
1.3.1 Materiálové faktory pevnosti spoje	11
1.3.2 Výrobní faktory pevnosti spoje	12
1.4 Testování pevnosti pájeného spoje	12
1.4.1 Pevnostní zkouška střihem (shear test).....	13
1.4.2 Pevnostní zkouška tahem (pull test)	14
1.5 Zařízení pro měření pevnosti pájeného spoje	15
1.5.1 Motorizované programovatelné posuvy v ose z.....	16
2 Měřicí manuální pracoviště	16
2.1 Siloměr MARK-10 M5-100.....	17
2.2 Program MESURgauge	17
2.3 Trhací mechanika.....	17
2.4 Systém uchycení DPS	18
2.4.1 Konfigurace pro pevnostní zkoušky střihem	18
2.4.2 Konfigurace pro pevnostní zkoušky tahem	19
Praktická část	20
3 Měření pevnosti pájeného spoje	20
3.1 Pevnost pájeného spoje součástek SMT	20
3.2 Pevnost pájeného spoje u THT vývodu v tahu	21
3.2.1 Pevnost pájeného spoje u THT vývodu zapájeného v 1 pokoveném otvoru	21
3.2.2 Pevnost pájeného spoje u THT vývodu zapájeného ve 2 pokovených otvorech	22
3.2.3 Pevnost pájeného spoje u THT vývodu zapájeného natupo na ploše..	22
4 Nedostatky měřicí soustavy	23
4.1 Manuální ovládání měřicí soustavy	24

4.2	Uchycení DPS pro měření pevnosti pájeného spoje v tahu	24
4.2.1	Nástroj měřidla MARK-10 M5-100 pro uchycení vývodu	25
5	Návrh řešení nedostatků	25
5.1	Programovatelný automatizovaný posuv v z-ose	26
5.1.1	Pohonný prvek posuvu	26
5.1.2	Konstrukční úprava mechaniky posuvu	28
5.2	Návrh držáku DPS pro měření pevnosti v tahu	29
5.2.1	Návrh úpravy hlavy na měření pevnosti pájeného spoje v tahu	29
6	Realizace návrhu	30
6.1	Řídicí jednotka PushPull V1.0	30
6.1.1	Schéma zapojení řídicího obvodu a návrh PCB	31
6.1.2	Bezpečnost a elektrická ochrana elektroniky	33
6.1.3	Ovládací prvky a funkce	35
6.2	Kalibrace zařízení	36
6.2.1	Kalibrace nastavení rychlosti	36
6.2.2	Kalibrace proudového omezení	37
6.3	Vylepšení posuvné mechaniky	38
6.3.1	Konečná podoba pracoviště na měření pevnosti pájeného spoje	39
6.4	Držák na DPS pro měření pevnosti pájeného spoje v tahu	40
6.4.1	Uchycení vývodů pro měření pevnosti pájeného spoje v tahu	41
7	Ověření funkce zařízení	41
7.1	Vzorky se součástkami SMD 0805 zapájenými slitinou SnBi	42
7.1.1	Srovnání výsledků SMT 0805 SnBi s výsledky přístroje DAGE	43
7.2	Vzorky se součástkami SMD 0805 zapájené slitinou SAC305	44
7.2.1	Srovnání výsledků SMT 0805 SAC305 s výsledky přístroje DAGE	44
7.3	Srovnání výsledků poloautomatizovaného měření s výsledky ručního měření	45
7.4	Testovací měření vzorků profesionálních desek	48
7.4.1	Vzorek DPS se součástkami SMD velikosti 0603 zapájené slitinou SnPb	49
7.4.2	Vzorky DPS se součástkami SMD velikosti 1206 zapájené slitinou typu SAC	50
7.5	Typické průběhy měření pájeného spoje pro slitiny SnBi a SAC305	52
7.5.1	Návrh implementace zařízení do výuky předmětu MMOT	53
8	Evaluace zařízení	55
8.1	Zhodnocení nákladů	55
8.2	Porovnání s profesionálním posuvem firmy MARK-10	56

9 Závěr	58
Literatura	60
Seznam symbolů, veličin a zkratk	62
Seznam obrázků	63
Seznam tabulek	65
Seznam rovnic	66
Přílohy	67
A Grafy a elektrotechnické výkresy	67
A.1 Manuální měření pevnosti pájeného spoje ve střihu.....	67
A.2 Měření pevnosti pájeného spoje v tahu.....	67
A.3 Osazovací výkres a rozpiska součástek DPS zařízení PushPull V1.0	68
B Strojní výkresy	69
B.1 Lineární aktuátor (převzato z [20]).....	69
B.2 Hliníkový profil tvaru C	70
B.3 Hliníkový profil tvaru hranol.....	71
B.4 Hliníkový profil – speciální, dodaný firmou SMTplus.....	72
B.5 Upravená osa lineárního posuvu.....	73
B.6 Svěrák lineárního vedení	74

ÚVOD

Měření a následné vyhodnocení pevnosti pájeného spoje je velice důležitým prvkem u zavádění nových produktů na trh u firem zabývajících se výrobou jak neosazených, tak osazených desek plošných spojů, či u firem produkujících pájecí slitiny a samotné elektrické komponenty.

Cílem takového, zpravidla destruktivního měření je získat přesné informace o tom, jak kvalitně je součástka připájena k desce plošných spojů. Takovéto informace mohou výrobci pomoci definovat nejen samotnou mechanickou odolnost výrobku, ale i vyvodit kvalitu procesů související s výrobním procesem produktu.

Pro takovéto měření se v dnešní době již používají sofistikované trhací přístroje, jež se zpravidla skládají z pohonu schopného vyvinout dostatečnou sílu k odtržení součástky, přesného siloměru, definované rychlosti posuvu a vyhodnocovacího programového vybavení. Díky opakovatelnosti měření mají výsledky těchto měření značnou vypovídací hodnotu.

Tato práce se zabývá teorií pevností pájeného spoje a spojení tohoto jevu s metodou testování pevnosti spoje mechanickým namáháním, kde bude popsán stávající stav měřicího zařízení nacházející v laboratoři Ústavu elektrotechnologií FEKT VUT, návrhem a realizací vylepšení tohoto zařízení, testovací měření a následná implementace tohoto zařízení do výuky.

TEORETICKÁ ČÁST

1 SPOLEHLIVOST PÁJENÉHO SPOJE

Na spolehlivost pájeného spoje může být kladeno mnoho různých pohledů, nejčastěji se však vychází z funkčního pohledu, kde je nejvíce rozhodující životnost pájeného spoje, což je časové rozmezí zajišťující spolehlivou funkci spoje. Na toto rozmezí má vliv řada činitelů, ovšem mezi ty základní patří:

- stárnutí materiálů,
- teplotní namáhání,
- mechanické namáhání. [1]

Dalšími mohou například být nedostatečné smáčení pájkou, nekompatibilita teplotních součinitelů délkové roztažnosti některých součástek a desky s plošnými spoji, nevhodné dávkování pájecí slitiny či samotný návrh DPS. [2] Většinou dochází ke kombinaci těchto činitelů, což jen negativně zvyšuje dopad na životnost pájeného spoje. Pro účely této práce je však nejdůležitější faktor mechanického namáhání a s ním spojená teorie pevnosti pájeného spoje.

1.1 Mechanické namáhání pájeného spoje

Mechanické namáhání je vyhodnocováno jako jedna z nejpodstatnějších příčin selhání pájeného spoje. [3] Dlouhodobým i krátkodobým působením mechanického namáhání může být pájený spoj poškozen v důsledku únavy materiálu v něm přítomném. Projevuje se postupným zhoršováním mechanických vlastností pájecí slitiny, vývodů a substrátu, následně pak dochází k mechanickému narušení spoje. Toto mechanické namáhání spoje je dvojího typu:

- vnitřní – namáhání spoje reakcí na změnu vnitřních fyzikálních poměrů,
- vnější – působením vnějších sil (úderu, vibrace atp.).

Vnitřní mechanické namáhání je spojeno ve většině případů s tepelnou zátěží na spoj a hodnotou TCE substrátu a součástky, což se projeví ve stykové oblasti, kterou reprezentuje spoj. Vnější je poté vztaženo na okolní mechanické působení na spoj, tedy na jevy, jež mohou nastat nejen nevhodným zacházením s deskou (např. prohnutí desky), ale i škodlivým pasivním faktorem zařízení, v němž je deska použita (např. vibrace). Jak vnitřní, tak vnější mechanické namáhání pájeného spoje lze účinně redukovat například použitím pružných vývodů (gull wing, drátové vývody, vývody typu „J“). [4]

V rámci testování pevnosti pájeného spoje je nejdůležitější znát chování pájeného spoje zatíženého ve střihu a v tahu, neboť takovéto mechanické namáhání spojů je v praxi nejčastější.

1.2 Vlastnosti pájeného spoje ve střihu (shear) a v tahu (pull)

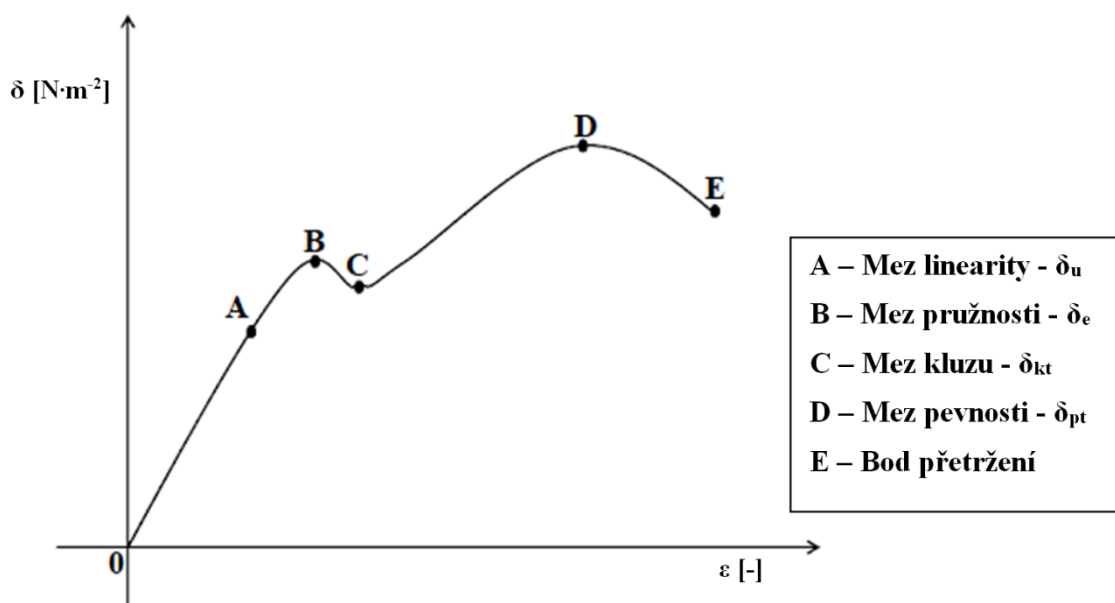
Mechanické vlastnosti pájeného spoje závisí na celé struktuře spoje. Tato struktura je ovlivněna více parametry, nejdůležitější však jsou:

- materiál pájecí slitiny (případně jeho znečištění),
- tvar a velikost pájeného spoje,
- parametry intermetalické oblasti.

Pájecí slitina při obou těchto namáhání prochází postupně třemi stupni deformace [2][4]:

1. elastická deformace,
2. plastická deformace,
3. přerušení spoje.

Toto chování pájecí slitiny při mechanické zátěži lze předpokládat ze závislosti relativního prodloužení (ε) na mechanickém namáhání (δ). Tato závislost je graficky vynesena v obrázku 1.1.



Obr. 1.1 Grafická závislost prodloužení na mechanickém namáhání, převzato z [5]

Pro vyhodnocení testů mechanického namáhání materiálu není důležitá pouze konečná hodnota bodu přetržení, nýbrž celý průběh měření. Nejdůležitější pro evaluaci jsou kromě již zmíněného bodu přetržení meze linearity, pružnosti, kluzu a pevnosti.

1.2.1 Meze mechanického namáhání materiálu

Mez linearity ohraničuje elastickou deformaci materiálu. Do této meze se materiál po konci působení vyvíjeného namáhání navrátí do svého původního stavu. Úsek od počátku po mez linearity vymezuje oblast platnosti Hookova zákona, přímo popisující pružnou deformaci materiálu, jež po odstranění působení zmizí, jeho matematické vyjádření je definováno vztahem [6]

$$\delta = \varepsilon \cdot E, \quad (1.1)$$

kde δ [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$] označuje mechanické napětí, ε [-] označuje relativní prodloužení a E označuje modul pružnosti v tahu. Relativní délkové prodloužení ε lze matematicky vyjádřit vztahem [5]

$$\varepsilon = \Delta l \cdot l_0^{-1}, \quad (1.2)$$

kde Δl [m] představuje změnu sledované délky a l_0 [m] původní hodnotu sledované délky. Mechanická napětí je definováno jako vztah působící síly na určitý průřez (plochu),

dostáváme vztah [6]

$$\delta = F \cdot S^{-1}, \quad (1.3)$$

kde F [N] představuje působící sílu a S [m²] představuje průřez vzorku (např. spoje).

Mez pružnosti označuje hodnotu, kdy stále dochází k pružné deformaci, vzorek se tedy po konci působení vyvíjeného namáhání navrátí do původního stavu, deformace však již není lineárně závislá na mechanickém napětí. V oblasti mezi mezí linearit a mezí pružnosti neplatí Hookův zákon. Po této mezi již nastává v materiálu plastická deformace. [5]

Mez kluzu označuje bod, ve kterém začne v materiálu docházet k tečení (tzv. creep), po této mezi dochází v materiálu i při malém zvýšení síly k velké deformaci. V pájeném spoji dochází vlivem creepu ke křehnutí spoje. [4][5]

Mez pevnosti popisuje bod, kdy je aplikováno maximální namáhání, v tomto bodě však ještě nemusí dojít k narušení spoje, konečné narušení definuje až bod přetržení. [5]

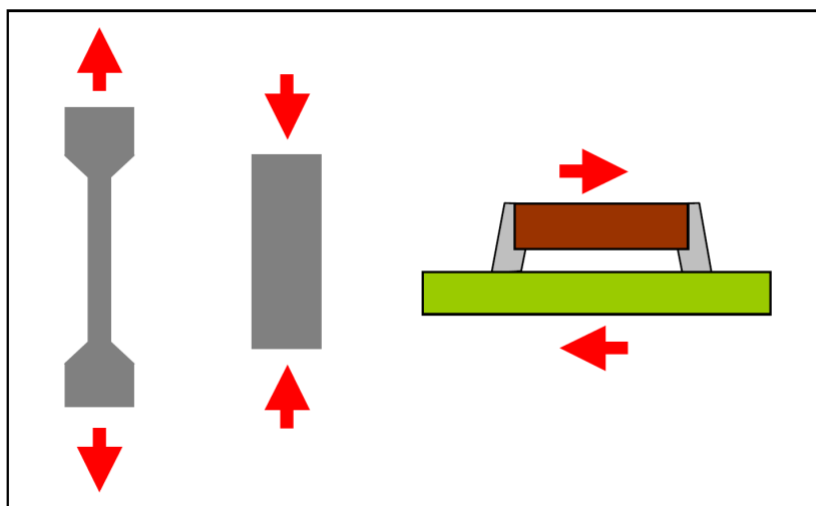
1.3 Pevnost pájeného spoje

Pevnost se definuje jako fyzikální vlastnost materiálů v pevném skupenství, která popisuje míru odolnosti daného materiálu vůči vnějšímu mechanickému namáhání, přičemž její fyzikální rozměr je Pascal. [7]

Zcela analogicky je pevnost pájeného spoje definována jako odolnost spoje vůči vnějšímu mechanickému působení. V této analogii pak můžeme popsat tři typy pevnosti pájeného spoje a to

- pevnost v tahu (pull test),
- pevnost v tlaku (push test),
- pevnost ve stříhu (shear test). [8]

Na tyto typy pevností jsou zaměřené specializované pevnostní testy, přičemž se test logicky často volí dle použité montážní technologie. Tyto testy naznačuje obrázek 1.2.



Obr. 1.2 Grafické naznačení typů testů pevností (zleva doprava pull, push, shear), převzato z [8]

Pevnost v tlaku se od pevnosti v tahu liší pouze směrem síly působící na zkoumaný spoj, jenž je opačný. V obou případech pevnost označuje bod, kdy ve spoji nastanou plastické

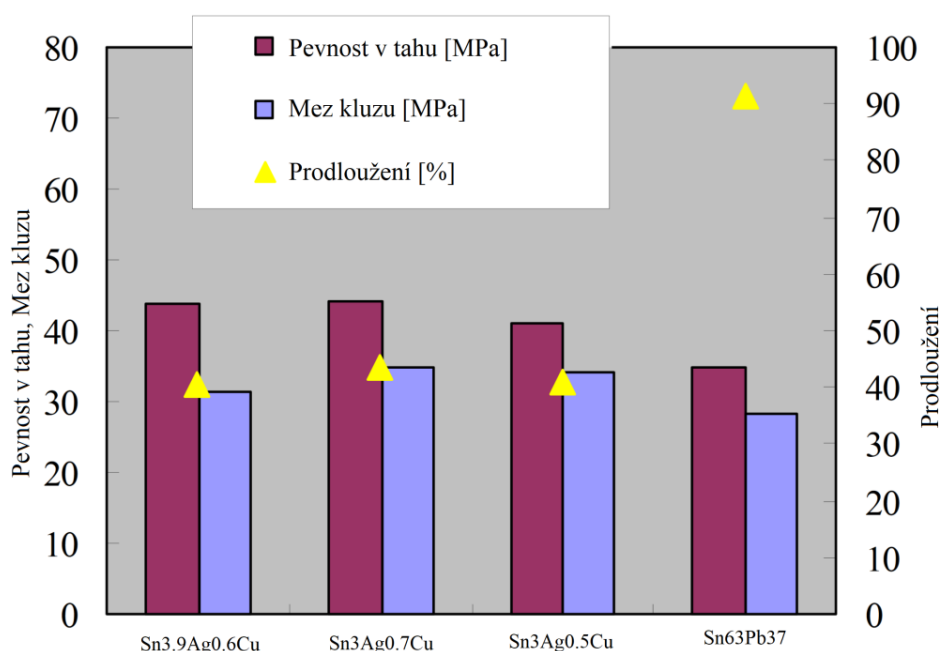
(nevratné) deformace.

Pevnost ve stříhu označuje bod, kdy rovněž nastanou plastické deformace spoje, nicméně síla zde nepůsobí na spoj kolmo, ale její směr je ke spoji vodorovný, tudíž dochází k deformaci smykem. Pevnost ve stříhu je tak jedna z nejdůležitějších hodnot při měření pevnosti pájených spojů SMT součástek, neboť k působení smykových sil dochází často při nesprávné manipulaci s osazenou deskou plošných spojů (ohyb DPS, náraz do hrany DPS). [4]

Ačkoliv fyzikální rozměr pevnosti je jednotka tlaku, jako hodnota pevnosti pájeného spoje u keramických pouzder normovaných velikostí se také označuje maximální působící síla, po jejímž překročení se pájený spoj destruktivně poškodí (součástka se utrhne). Hodnota pevnosti v jednotkách tlaku se dá tak snadno určit přepočtem.

1.3.1 Materiálové faktory pevnosti spoje

Pevnost pájeného spoje je z velké části dána materiálem použitým ke zhotovení tohoto spoje. Všechny typy pájecích slitin nemají stejné mechanické schopnosti (např. pevnost v tahu). To je dobře vidět z obrázku 1.3, kde je porovnáno více typů pájecích slitin z hlediska pevnosti v tahu a prodloužení daného vzorku.



Obr. 1.3 Porovnání pájecích slitin v tahu (okolní teplota = 20 °C, rychlost tažení = 10 mm/min), převzato z [9]

Dalšími aspekty jsou poté například množství nanesení pájecí slitiny, jež ovlivňuje výslednou geometrii spoje, vliv intermetalických fází, samotná smáčivost pájecí slitiny i pájených povrchů, k níž se váže problematika tavidel aj. Tavidlo má pozitivní vliv na smáčivost pájky a tedy i na pevnost spoje, ovšem negativní vliv na spoj z hlediska koroze vlivem tavidlových zbytků. Zlepšení smáčivosti lze rovněž dosáhnout jinými prostředky (např. jinou povrchovou úpravou plošek DPS). [2]

1.3.2 Výrobní faktory pevnosti spoje

Z pohledu výrobního procesu je nejdůležitější dodržet pokyny z katalogových listů pájecích slitin od výrobce dané slitiny. Tedy především použití odpovídajícího tavidla a dodržení pájecích pokynů, které jsou u pájení přetavením často charakterizovány teplotním profilem dané slitiny, z něhož nejpodstatnější jsou čtyři údaje:

- teplotní gradient přehřevu,
- čas nad teplotou liquidu (doba, po kterou je slitina v tekutém skupenství),
- vrcholová teplota,
- teplotní gradient chlazení.

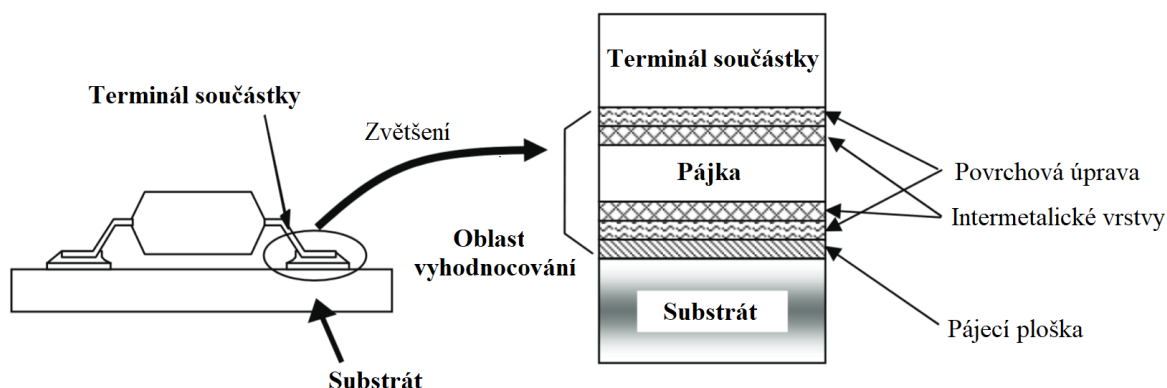
Přičemž teplotní gradient přehřevu označuje rychlost nahřívání ve stupních Kelvina za sekundu a analogicky teplotní gradient chlazení označuje rychlost chlazení. Tyto dvě hodnoty je velmi důležité dodržet, neboť obě dvě souvisí s tvorbou intermetalické vrstvy, jež je u pájeného spoje potřebná, ovšem tato vrstva je rovněž velmi křehká, proto její nadměrný nárůst má negativní dopad na celou pevnost spoje. Obecně se udává, že by se mělo „přehřívát pomalu, chladit rychle“, exaktněji můžeme tuto podmínku popsat teplotním gradientem přehřevu DPS v oblasti 0,6 – 2 K/s a teplotním gradientem chlazení DPS v oblasti 3 – 5 K/s. [10]

Při nedostatečném času nad teplotou liquidu hrozí nekvalitní či neúplné zapájení všech komponent, což způsobuje výrazné zhoršení spolehlivosti, naopak nadměrná doba nad teplotou liquidu opět vede k tvorbě nežádoucích přírůstků v intermetalických vrstvách. [2]

Při pájení vlnou je pájka neustále v roztaveném stavu, je důležité tedy hlavně dodržet výrobcem předepsanou teplotu pájecí slitiny ve vaně, prodlevu v roztavené pájce, teploty přehřevu v pájecí vlně pro správnou aktivaci tavidla a gradienty chladnutí spoje pro správnou mikrokystalickou strukturu.

1.4 Testování pevnosti pájeného spoje

Je důležité si uvědomit, že pájený spoj se skládá z více vrstev. Nejde tedy jednoznačně říci, zda pevnostní zkouškou budeme testovat pevnost pájecí slitiny, intermetalické vrstvy, či pevnosti samotných plošek, nebo povrchu terminálů součástek. Přerušení spoje navíc může dojít na rozhraní těchto vrstev, proto je oblast vyhodnocování těchto zkoušek brána jako oblast mezi povrchem terminálu spoje a povrchem substrátu, což je u SMT součástky naznačeno na obrázku 1.4. U THT součástek je situace stejná, jen celý spoj má tvar trubice uvnitř s měděným vývodem různého průřezu a pájkou vyplňující pokovený otvor a smáčením vytvářející menisky mezi vývodem i pájecím mezikružím.



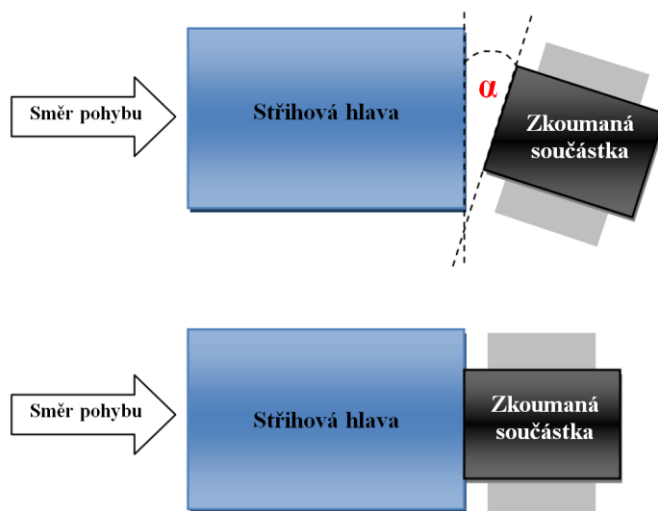
Obr. 1.4 Naznačení vrstev pájeného spoje a oblasti vyhodnocení pevnostních zkoušek, převzato z [11]

Spoj jako takový můžeme testovat mnoha způsoby, např. kroucením, tahem, tlakem, ohybem, stříhem a tak dále, z čehož nejpoužívanější je testování tahem a stříhem. Pevnostní zkoušky v tahu u SMT součástek podrobně popisuje norma IEC 62137-1-1 a ve stříhu u SMT součástek norma IEC 62137-1-2. [12]

1.4.1 Pevnostní zkouška stříhem (shear test)

Zkouška se provádí za účelem zjistit pevnost pájeného spoje při zatlačení na součástku zpravidla ve směru rovnoběžném se substrátem, čímž se vyvolá smykový pohyb součástky a následné odtržení součástky. Tato metoda je velmi častá u testování pevnosti spojů u SMT součástek, použít se naopak nedá u THT součástek.

Norma IEC 62137-1-2 udává pravidla stříhové zkoušky, především hovoří o nastavení trhací hlavy, která musí být nastavena tak, že se nesmí při testování opřít o meniskus spoje, rovněž nesmí být příliš vzdálená od substrátu DPS, měla by sahat minimálně do 75 % opěrné plochy připájené součástky. Norma rovněž stanoví, že úhel α , který svírají opěrná plocha součástky a trhací hlavy musí v ideálním případě být roven 0° , jak je naznačeno na obrázku 1.5. [13]



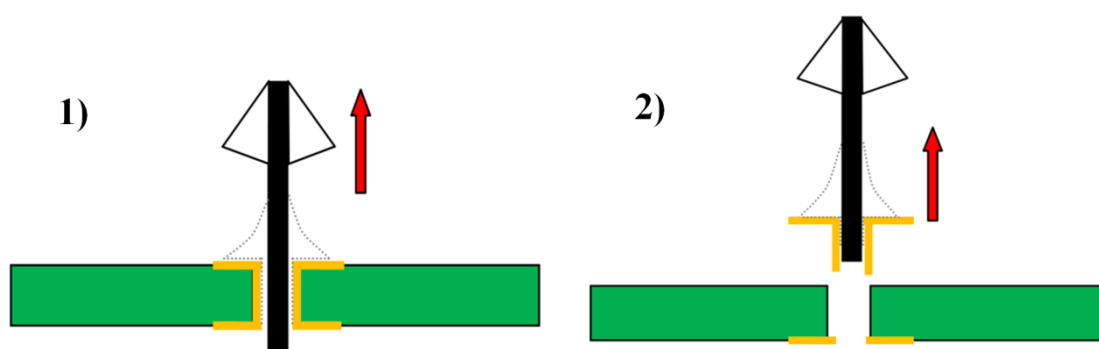
Obr. 1.5 Správné nastavení stříhové hlavy vůči testované součástce

Při zkoušce stříhem se rovněž stříhová hlava nesmí opřít o meniskus pájeného spoje. Síla působící na součástku by v ideálním případě měla narůstat velmi pomalu, aby bylo možné dosáhnout co nejexaktnějšího výsledného záznamu průběhu. Nedodržení těchto pravidel poté vede ke zkreslení výsledků.

1.4.2 Pevnostní zkouška tahem (pull test)

Zkouška se provádí za účelem zjistit pevnost pájeného spoje při zatažení za vývod součástky, zpravidla ve směru kolmém na substrát. Tato metoda je vhodná jak na testování SMT součástek, tak na testování THT součástek. U součástek THT se často simuluje trhání skutečných součástek trháním pouhých vývodů. [14]

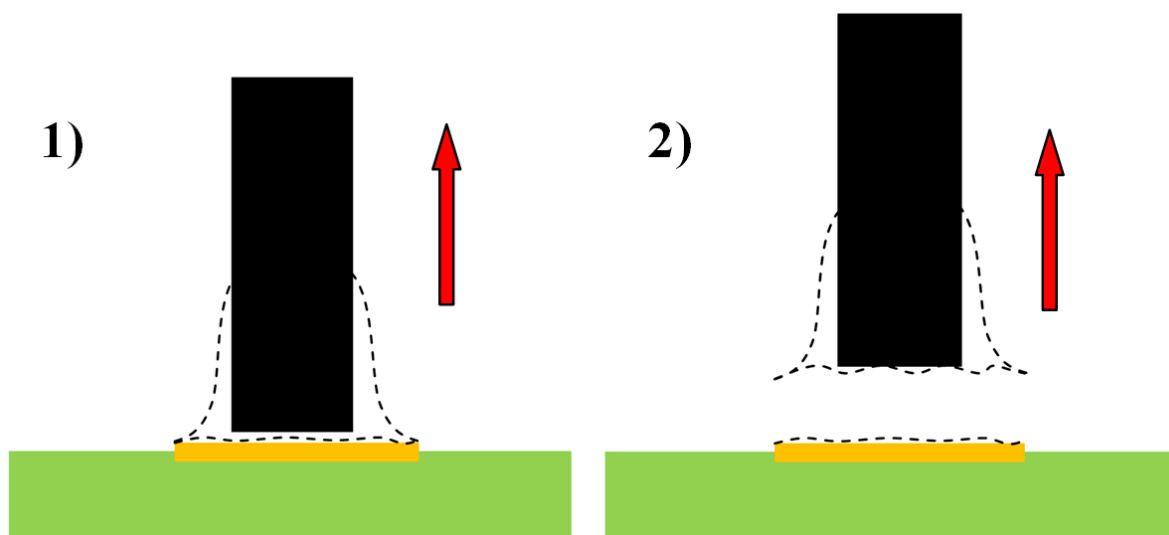
U této metody je často problematické samotné uchycení vývodů do měřicí soustavy, neboť vývod by se neměl během měření vyvlékat z trhačí hlavy. Průběh takového měření je zobrazen na obrázku 1.6.



Obr. 1.6 Možný průběh tahové zkoušky na vývodu THT součástky (varianta s vytržením pokoveného otvoru)

Problémem takového určení pevnosti pájeného spoje tkví ovšem v pevnosti materiálu vývodu. Pokud je tato pevnost menší než pevnost zapájeného spoje, vývod se při měření přetrhne a výsledná maximální síla bude označovat pevnost materiálu vývodu, nikoliv pájeného spoje.

V případě testování SMT součástek tahem, lze jako příkladné použít testování pevnosti tupého spoje. U takového testování lze velmi dobře opět využít simulování této situace použitím pouhého vývodu zapájeného na plošku a následného vytrhnutí. Průběh takového měření je zobrazen na obrázku 1.7.



Obr. 1.7 Možný průběh tahové zkoušky na vývodu zapájeném natupo SMT součástky (varianta s přetržením v pájecí slitině)

1.5 Zařízení pro měření pevnosti pájeného spoje

Obecně lze říci, že ke změření pevnosti pájeného spoje je potřeba zařízení, jež je vybaveno trhacím nástrojem schopným vyvinout dostatečnou sílu pro utržení připájené součásti a siloměrné měřidlo zaznamenávající průběh měření, spolu s držákem pro fixování zkoumané DPS.

Pro měření pevnosti pájeného spoje jsou dnes již na trhu dostupné kompletní měřicí soustavy. Kompletní soustava zpravidla obsahuje upevňovací systém pro DPS, digitální siloměr s programovým vybavením pro zaznamenávání naměřených hodnot a nastavitelnou motorizovanou jednotku realizující pohyb trhacího nástroje. Příklad takovéto měřicí soustavy je zobrazen na obrázku 1.8.



1.5.1 Motorizované programovatelné posuvy v ose z

Pro účely této práce je podstatné zmínit hlavně teorii motorizovaných posuvů těchto měřicích zařízení. Dražší komplety trhacích strojů jsou vybaveny motorizovaným automatickým posuvem, jenž je schopen vyvinout dostatečnou sílu pro provedení celého měření.

Jako pohon pro tyto jednotky se používají motory s velkou vyvíjecí silou, která je pak jedním ze specifíků celého přístroje. Kvalitnější přístroje zpravidla používají dostatečně silný krokový motor, regulace jeho chodu je pak řízena pomocí převodovky (nebo soustavou převodovek). Levnějším řešením těchto pohonů je použití již zkompleťovaných vyvíjecích silových pohonů (např. lineární aktuátor, motory se šnekovou převodovkou). Maximální vyvíjecí síly se přístroj od přístroje různí, obecně lze ale říci, že se maximální vyvíjecí síly těchto posuvů pohybují v řádu jednotek kN.

Hlavní a nejdůležitější výhodou automatizovaného měření pomocí posuvu je fakt, že motor pohybuje měřidlem konstantní rychlostí. Další nespornou výhodou je fakt, že je možné (u většiny těchto posuvů) jejich rychlost nastavit a to dokonce i na velmi malé hodnoty pod 1 mm/s. Průběh celého měření je díky tomu velmi kvalitně zaznamenán, neboť samotné utržení zkoumané součástky proběhne dostatečně pomalu a pozvolna. Tyto výhody jsou velmi podstatné z hlediska opakovatelnosti měření.

Prominentní firma z oblasti trhacích strojů použitelných pro elektrotechnické účely je například firma Nordson DAGE.

2 MĚŘICÍ MANUÁLNÍ PRACOVÍŠTĚ

Pracoviště je vybaveno měřicí soustavou určenou k měření pevnosti pájeného spoje. Soustava se sestává z digitálního siloměru MARK-10 M5-100, softwarového vybavení k siloměru MESURgauge od firmy MARK-10, trhací mechaniky již zastupuje držák stojanové vrtačky, upevňovací systém pro zkoumanou DPS a USB mikroskopem pro pozorování procesu měření. Celá soustava je vyobrazena na obrázku 2.1.



Obr. 2.1 Laboratorní měřicí soustava pro měření pevnosti pájeného spoje

2.1 Siloměr MARK-10 M5-100

Digitální siloměr je přimontován do pravoúhlého profilu zajišťující kolmost měřicího výstupu k zemi. K siloměru je rovněž dodáno balení příslušenství obsahující různé měřicí nástavce. Siloměr je zobrazen na obr. 2.2.



Obr. 2.2 Siloměr MARK-10 M5-100

Siloměr má měřicí rozsah -500 N až 500 N, přičemž maximální povolený přesah minima i maxima je 250 N, při přesáhnutí této hodnoty hrozí nenávratné poškození přístroje.

Při přesáhnutí hodnoty 550 N (respektive -550 N) přístroj výstražně pípne a displej zobrazuje signál OVER. V tomto případě je potřeba zmáčknout tlačítko MENU, popř. vrátit se působící silou na hodnotu v mezích rozsahu měřidla. [16]

2.2 Program MESURgauge

Programové vybavení pochází přímo od firmy MARK-10 a je schopné zpracovávat data z měřidla MARK-10 M5-100. Programové vybavení nabízí širokou škálu nastavení jak pro způsob použití siloměru (pouze měřidlo, měřidlo s motorizovaným posuvem atd.), tak pro samotné provedení měření.

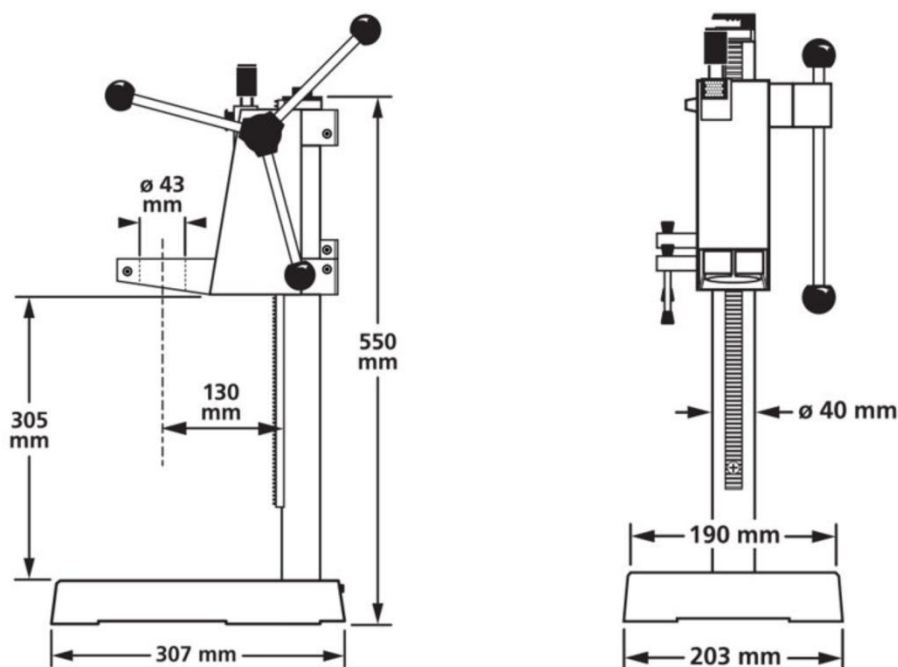
Velmi podstatné ovšem je, že program umožňuje nastavení velikost vzorkování měření a nastavení počáteční a konečné síly měření v několika módech. Při vhodném nastavení programu a užitím vhodného typu posuvu lze získat data, jež nebudou vyžadovat úpravu z hlediska posunu na časové ose, či manuálního ořezu grafického výstupu měření. Program také podporuje export naměřených dat ve formátu CSV, což umožňuje možnost zpracování v tabulkových editorech.

2.3 Trhací mechanika

Mechanika pro realizaci posuvu trhacího měřicího hrotu je řešena použitím stojanu pro vrtačku Wolfcraft 5027000 (zobrazen na obrázku 2.3). Na stojanu je možné nastavit rozsah, ve kterém se posuv pohybuje, pracovník provádějící měření ovládá mechaniku pomocí ovládacích pák na straně stojanu.

Výhoda tohoto stojanu tkví hlavně v pravoúhlosti posuvu vůči zemi, přimontované

měřidlo není tedy nutné nijak kalibrovat z hlediska úhlu.



Obr. 2.3 Stojan na vrtačku Wolfcraft 5027000, převzato z [17]

2.4 Systém uchycení DPS

Systém umožňuje upevnit zkoumanou DPS kolmo vůči zemi, či vodorovně se zemí. Způsob upevnění DPS kolmo vůči zemi je využíván pro pevnostní zkoušky SMT součástek stříhem, zatímco upevnění desky vodorovně vůči zemi je využíváno pro měření pevnosti pájených spojů v tahu.

2.4.1 Konfigurace pro pevnostní zkoušky stříhem

Uchycovací držák DPS pro stříhové zkoušky SMT součástek byl v minulosti zkonstruován v rámci závěrečné práce. [16] Držák je dostatečně tuhý a celý systém nastavování je realizován pomocí imbusových šroubů (viz obrázek číslo 2.4). Nastavit je možno konkrétně tyto parametry:

- velikost úchytu pro různé velikosti DPS,
- vzdálenost DPS od trhacího hrotu,
- míra podepření DPS, jako zabránění průhybu desky při měření.

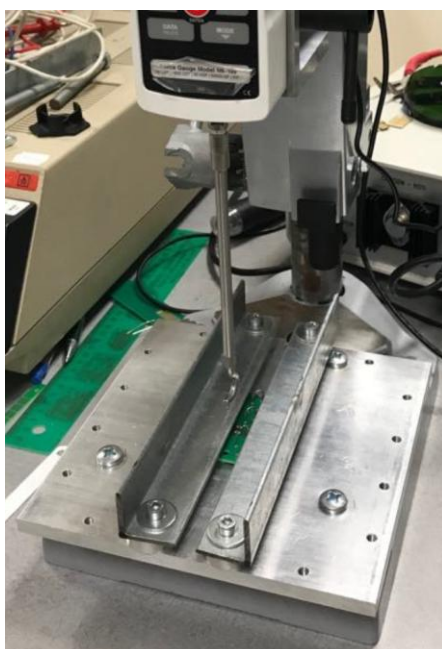


Obr. 2.4 Držák pro pevnostní zkoušky střihem

Držák je pravoúhlý, a proto není nutné nastavovat pravoúhlost desky vůči trhacímu hrotu. Celá konstrukce je jednoduše obsluhovatelná.

2.4.2 Konfigurace pro pevnostní zkoušky tahem

Uchycení DPS pro tahové zkoušky je realizováno pomocí distančních sloupků a dvou L profilů, jež jsou upevněny imbusovými šrouby, viz obrázek 2.5. Při tahové zkoušce se zkoumaná DPS zvedne a pohybem vzhůru se zarazí o L profily (úhelníky), čímž je zajištěna určitá potřebná fixace DPS.



Obr. 2.5 Fixace DPS pro pevnostní zkoušky tahem

Obsluhující pracovník musí při každém jednotlivém měření držák částečně rozmontovat a upevnit měřený předmět (například vývod) do měřícího nástroje, poté držák opět smontovat a realizovat měření.

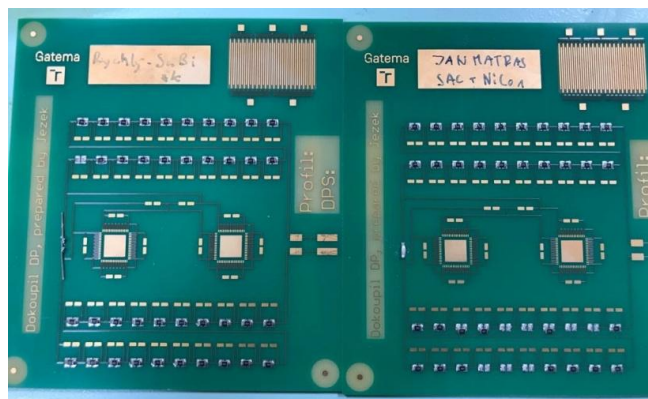
PRAKTICKÁ ČÁST

3 MĚŘENÍ PEVNOSTI PÁJENÉHO SPOJE

Na přístroji bylo provedeno několik sad měření pro obeznámení se s celkovou funkčností měřicí soustavy. Konkrétně byly testovány pevnosti pájeného spoje součástek SMT, pevnosti pájeného spoje u THT vývodu a pevnosti pájeného spoje u THT vývodu zapájeného natupo. Výsledky těchto měření pevnosti budou porovnány z hlediska maximálních dosažených hodnot síly.

3.1 Pevnost pájeného spoje součástek SMT

Pro měření pevnosti pájeného spoje u součástek SMT byly vybrány dvě již předem osazené desky, přičemž obě obsahovaly součástky 0805 (viz obrázek 3.1). Spoje na jedné desce byly zapájeny pomocí pájecí pasty SAC305 a spoje na druhé desce byly zapájeny pomocí pájecí pasty SnBi. Pro toto měření byla využita konfigurace přístroje pro měření pevnosti pájeného spoje ve stříhu (viz kapitola 2.4.1).



Obr. 3.1 Testovací desky pro měření pevnosti pájeného spoje ve stříhu

Pro každou z desek bylo provedeno 10 měření, přičemž u obou bylo 1 z měření vyhodnoceno jako chybné, a nebylo zahrnuto do srovnání. Naměřené pevnosti pájených spojů ve stříhu jsou shrnuty v tabulce 3.1.

Tab. 3.1 Srovnání pájených spojů ve stříhu SMT součástek 0805 slitin SnBi a SAC305

Číslo měření	F_{SnBi} [N]	F_{SAC305} [N]
1	85,1	80,3
2	92,7	79,9
3	79,3	92,5

4	79,6	
5	94,7	79,6
6	94,8	94,7
7	99,6	94,8
8	86,0	115,2
9		86,0
10	105,6	105,6
Průměr:	91,0	92,1

Po zprůměrování naměřených hodnot je možno usuzovat, že pájený spoj zapájený pastou SnBi má nižší pevnost než spoj zapájený pastou SAC305. Rozdíl $\Delta F=1,1$ N však nelze považovat za markantní. Grafické znázornění průběhu měření u pasty SnBi je zobrazeno na obrázku 4.1, grafické znázornění průběhů měření u pasty SAC305 je zobrazeno v příloze A.1.

3.2 Pevnost pájeného spoje u THT vývodu v tahu

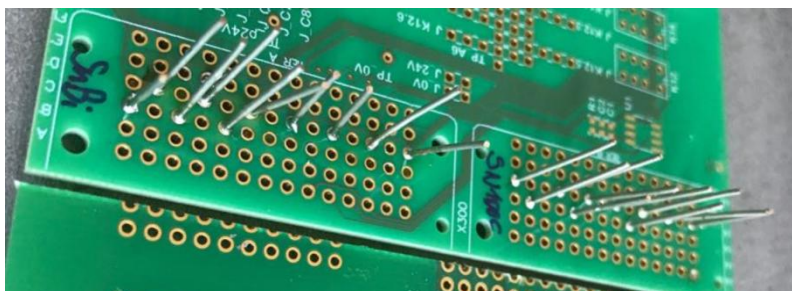
Pro měření pevnosti pájeného spoje u THT vývodu byly vybrány testovací desky s definovanými velikostmi pokovených otvorů spolu s vývody definovaných rozměrů, rovněž byla testována pevnost pájeného spoje v tahu u THT vývodu zapájeného na plošce definovaných rozměrů (viz tabulka 3.2). Dále byly zvoleny 3 typy pájecích slitin (SnBi, SAC305, SN100C), jenž měly být z hlediska pevnosti pájeného spoje porovnány. Pro tyto měření byla zvolena konfigurace měřicího zařízení pro měření pevnosti pájeného spoje v tahu viz kapitola 2.4.2).

Tab. 3.2 Průměry vývodů a rozměry pokovených otvorů a plošek použitých při měření pevnosti pájeného spoje v tahu

Průměr vývodu [mm]	Vnitřní průměr pokoveného otvoru [mm]	Rozměry plošky [mm]
0,7	1,0	1,8

3.2.1 Pevnost pájeného spoje u THT vývodu zapájeného v 1 pokoveném otvoru

Pro toto měření byly zvolené vývody zapájeny do zvolených pokovených otvorů a ručně zapájeny (viz obrázek 3.2).



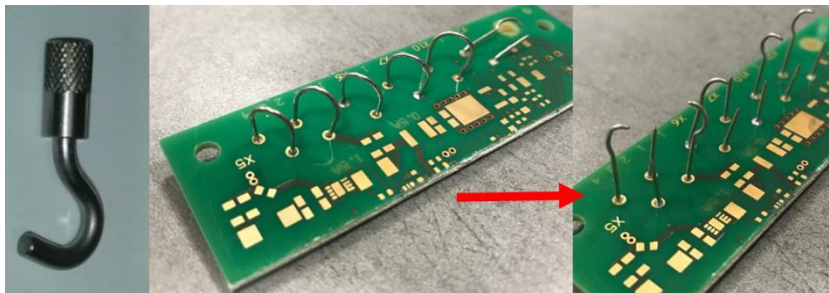
Obr. 3.2 Zapájené testovací vzorky pro měření pevnosti pájeného spoje v tahu (1 pokovený otvor)

Měření však nebylo úspěšné, neboť se u několika vzorků vývod vyvlékal z trhací hlavy vlivem nedostatečného ručního dotažení a u zbývajících vzorků se vývod přetrhl. Nedošlo tedy ani k jednomu úspěšnému měření pevnosti pájeného spoje v tahu, neboť k přerušení došlo vždy v těle vývodu, nehledě na typ pájecí slitiny. Důležitým poznatkem ovšem je, že velikost pevnosti takového spoje přesahuje velikost pevnosti samotného vývodu v tahu. Průměrná hodnota pevnosti testovaného vývodu je $F=120,2\text{ N}$.

3.2.2 Pevnost pájeného spoje u THT vývodu zapájeného ve 2 pokovených otvorech

Pro toto měření byly testované vývody natvarovány do tvaru písmene U a zapájené do dvou pokovených otvorů najednou. Následně byly vývody zachyceny za hákovou trhací hlavu a bylo provedeno měření. Tento způsob měření byl zvolen jako zamezení vyvlékání vývodu z klešťové hlavy (viz kapitola 3.2.1).

I toto měření nicméně skončilo neúspěchem, neboť u všech vzorků opět došlo v přerušení v těle vývodu, nikoliv v pájeném spoji, nehledě na použitou pájecí slitinu. Průměrná hodnota pevnosti takto zapájeného vývodu je $F=248,1\text{ N}$, což zhruba odpovídá dvojnásobku průměru z měření v kapitole 3.2.1, jelikož v jednom měření rovnoměrně zatěžujeme zdvojený vývod. Celé měření shrnuje obrázek 3.3.



Obr. 3.3 Háková hlava měřidla, vzorky tvaru písmene U před a po měření

Pro efektivní změření pájeného spoje v tahu u THT vývodu je tedy nutné navrhnout novou metodiku měření zahrnující zmenšení mezikruží mezi vývodem a pokoveným otvorem spolu se zvážením použití vývodu z pevnějšího materiálu (např. kovarové vývody).

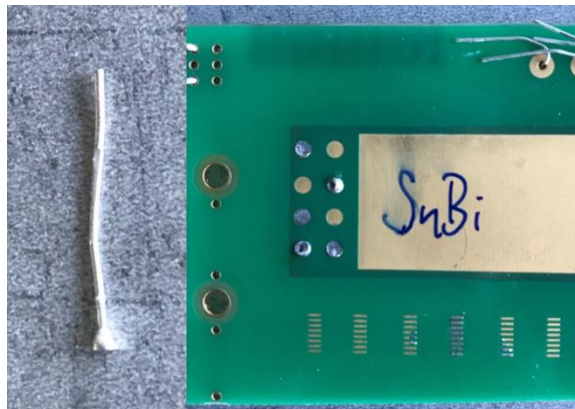
3.2.3 Pevnost pájeného spoje u THT vývodu zapájeného natupo na plošce

Pro toto měření byly testované vývody zapájené ručně natupo definovaným množstvím trubičkové pájky ($l = 4\text{ mm}$) natvarované do tvaru „hnízda“, viz obrázek 3.4.



Obr. 3.4 Natvarování trubičkové pájky, zapájené testovací vývody natupo na ploškách

U každé slitiny bylo provedeno 5 testovacích měření. U vzorků zapájených slitinou SAC305 a SN100C opět došlo k přetržení v těle vývodu, tyto měření byly tedy opět neúspěšné. Nicméně v případě slitiny SnBi bylo měření úspěšné a k přerušení došlo v pájeném spoji, viz obrázek 3.5.



Obr. 3.5 Pohled na vývod a plošky zapájené slitinou SnBi natupo po měření pevnosti pájeného spoje v tahu

Naměřené hodnoty pevností pájených spojů zapájených slitinou SnBi v tahu na vývodech zapájených natupo na ploškách shrnuje tabulka 3.3, grafické znázornění průběhů měření u slitiny SnBi je zobrazeno v příloze A.2.

Tab. 3.3 Naměřené pevnosti pájených spojů, slitina SnBi, vývody zapájené natupo na ploškách

Číslo měření	F_{SnBi} [N]
1	69,0
2	21,50
3	38,10
4	47,90
5	43,20
Průměr:	43,94

4 NEDOSTATKY MĚŘICÍ SOUSTAVY

Měřicí soustava pracoviště je dostačující z pohledu měření jedné hodnoty samotné pevnosti pájeného spoje u jednotkových zkoumaných subjektů. U více počtu měření lze rovněž využít srovnání dosažené maximální síly (pevnosti). Soustava má ovšem jako taková podstatné nedostatky.

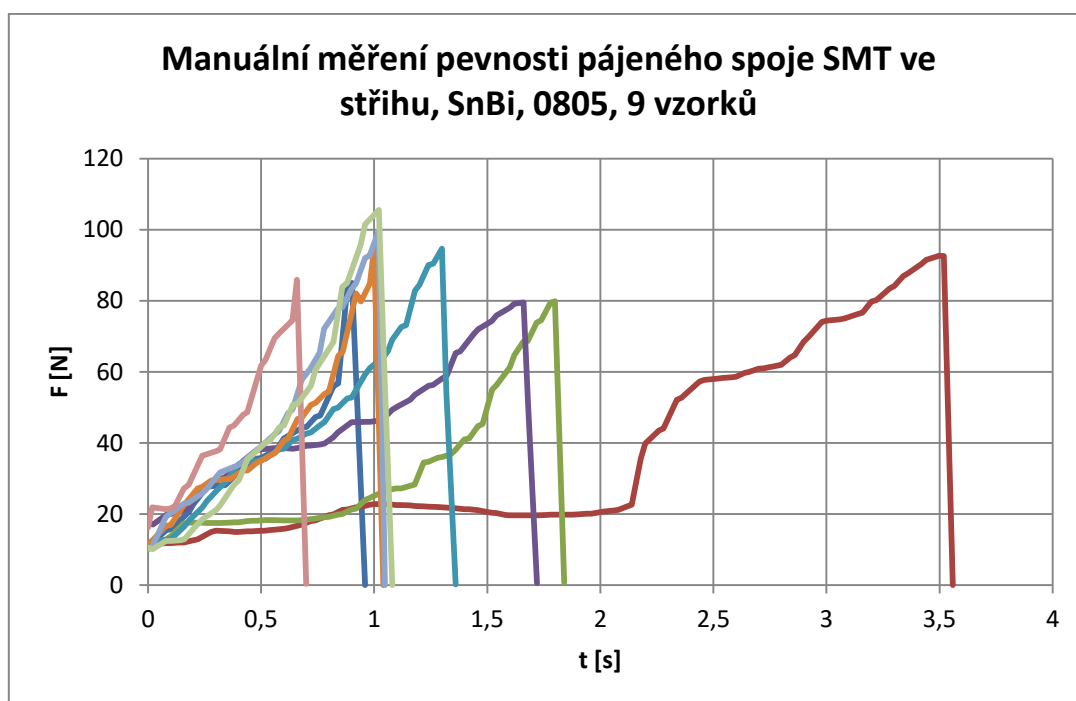
Největším problémem zařízení je v současné době manuální ovládání celého trhacího přístroje a s tím spojená problematika opakovatelnosti měření. Dalším značným problémem je špatná uživatelská obsluha zařízení pro měření pevnosti v tahu, způsobená uživatelsky

nepřívětivým řešením upevnění zkoumané DPS. Posledním výrazným problémem celého zařízení je dodaný systém uchycení vývodu do siloměrné sondy.

4.1 Manuální ovládání měřicí soustavy

Manuální ovládání trhací soustavy je v současné době viděno jako největší problém z hlediska opakovatelnosti měření. Momentálně je zařízení ovládáno taháním za otočné páky stojanu na vrtačku, na němž je siloměr upevněn. Rychlost, se kterou tedy trhací hrot vykonává měření, není konstantní a nemůže být ani definována, neboť obsluha zpravidla otáčí pákou při každém měření jinak rychle. Konstantní rovněž není ani nárůst síly působící na součástku, neboť obsluha toto není schopna odhadnout a ručně definovat.

Tento fakt prakticky znamená, že měření je částečně neopakovatelné, neboť není plně definovatelné. Při několika měření vzorků se stejnými parametry proto jde porovnávat pouze vrcholový maximální bod, po kterém se spoj přetrhne, neboť průběh grafu reflektuje nelinearitu nárůstu síly, jež obsluha na vzorek pomocí pák vyvíjí (viz obrázek 4.1).



Obr. 4.1 Porovnání průběhů manuálních měření pevnosti pájeného spoje ve střihu u 9 vzorků SMT součástek velikosti 1206, připájených pájecí pastou SAC305

4.2 Uchycení DPS pro měření pevnosti pájeného spoje v tahu

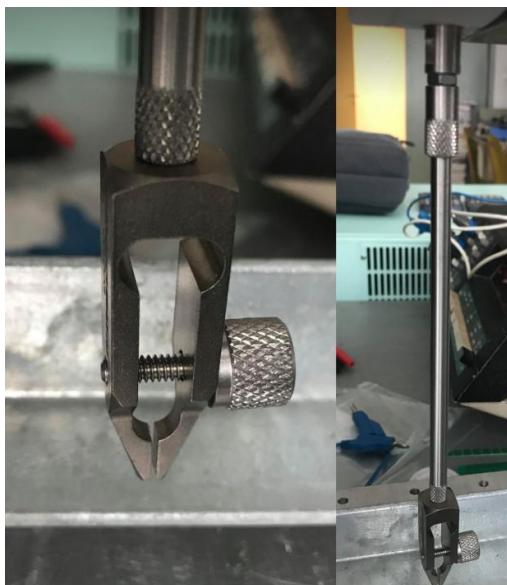
Momentálně je uchycení DPS pro měření pevnosti pájeného spoje v tahu řešeno dvěma L ocelovými profily připevněnými šrouby do základny stojanu (viz kapitola 2.4.2). Toto řešení omezuje pracovníka, neboť je neustále nucen při každém jednotlivém měření rozmontovat tento držák, což je časově náročné a pro větší série měření naprosto omezující.

Prostor mezi profily, skrz který prochází vývody, jež se upevňují do trhací hlavy, je navíc velmi úzký a prakticky znemožňuje upevnit kratší vývod do trhací hlavy po smontování držáku, obsluha tedy musí nejdříve upevnit vývod do trhací hlavy, podržet ovládací pákou

trhací hlavu na místě, smontovat držák a až poté zahájit měření. Testovací vývody také musí být zapájeny v linii, neboť při zapájení v jiných obrazcích by nebylo schopné měřit, jelikož by vývody neprošly skrz prostor mezi profily.

4.2.1 Nástroj měřidla MARK-10 M5-100 pro uchycení vývodu

V balení digitálního siloměru MARK-10 M5-100 je jako příslušenství přiloženo několik typů trhacích hrotů, přičemž jeden z hrotů je proveden ve tvaru malého utahovatelného svěráku. Tento hrot se používá k měření pevnosti pájených spojů u THT vývodů. Problém nastává v utahování tohoto svěráku, neboť je prováděno pomocí ručního šroubu na boku svěráku (viz obrázek 4.1).



Obr. 4.2 Uťahovací svěrákový hrot přiložení k zařízení MARK-10 M5-100

Tento šroub a celý hrot se dle návodu má dotahovat volně rukou, nikoliv nářadím. [16] Při dotahování rukou se však vývod z trhací hlavy vyvléká, což způsobuje chybné měření, a tedy zbytečnou destrukci vzorku. Zpravidla se přitom také vývod mechanicky poškodí, tudíž na něm nejde měření opakovat.

5 NÁVRH ŘEŠENÍ NEDOSTATKŮ

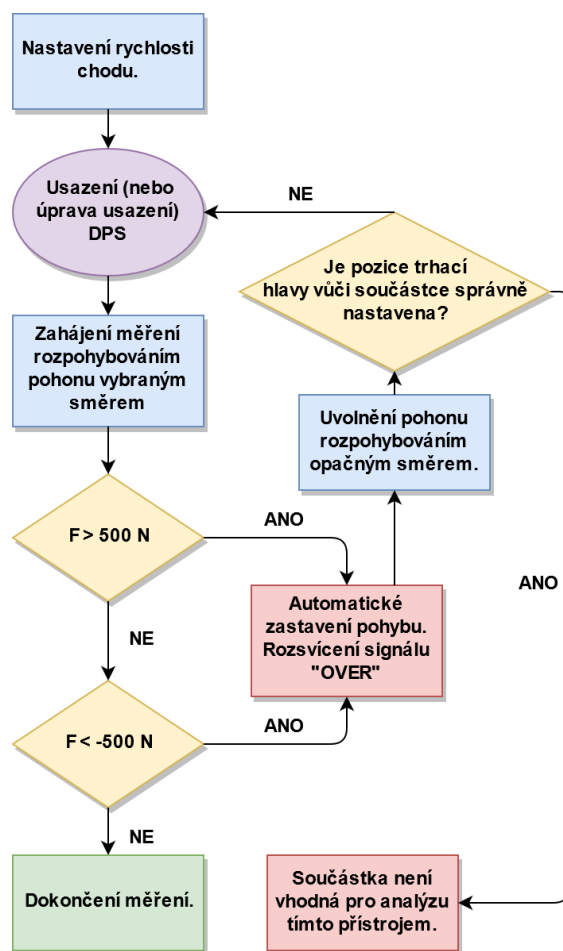
Jak již bylo zmíněno, největším nedostatkem celého přístroje je jeho manuální ovládání. Dosáhnout konstantní rychlosti pohybu trhací hlavy a s tím spojeného pozvolného nárůstu vyvíjecí síly působící na součástku lze pouze pomocí automatizované (či poloautomatizované) techniky. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto o řešení posuvu motorizovanou jednotkou s parametry dostatečnými pro tuto aplikaci. Řešení zároveň vyžaduje pokud možno co nejmenší změny v existující mechanice, vzhledem k již zkonstruovaným hrotům a držáku pro měření pevnosti pájeného spoje ve střihu.

Dále bylo rozhodnuto z důvodu nevyhovujícího aktuálního stavu navrhnout a zkonstruovat nový držák na zkoumané DPS pro měření pevnosti pájeného spoje v tahu. V potaz byl rovněž vzat návrh úpravy trhacího hrotu přiloženému k zařízení MARK-10 M5-100, jenž je v současnosti špatně využitelný.

5.1 Programovatelný automatizovaný posuv v z-ose

Jako návrh řešení problémovosti manuálního ovládání je nainstalování programovatelného automatizovaného posuvu v z-ose. Zároveň vzhledem k již vyrobenému příslušenství k celému zařízení je nutné zachovat co největší část celé mechaniky zařízení, neboť výroba nové pro již existující příslušenství by byla neekonomickým krokem.

Motor musí být schopen vyvinout sílu dosahující alespoň rozsahu užitého siloměru (viz kapitola 2.1) a zároveň být vybaven systémem rozpoznání dosažení maximálního rozsahu a následného automatického zastavení, jako ochranu proti možnému destrukci siloměru. Rovněž by u přístroje měla být přítomna možnost nastavení rychlosti posuvu, a to alespoň v rozsahu $0,4 - 4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Vývojový diagram celého zařízení při měření je zobrazen na obrázku 5.1.



Obr. 5.1 Vývojový diagram inovovaného zařízení při měření

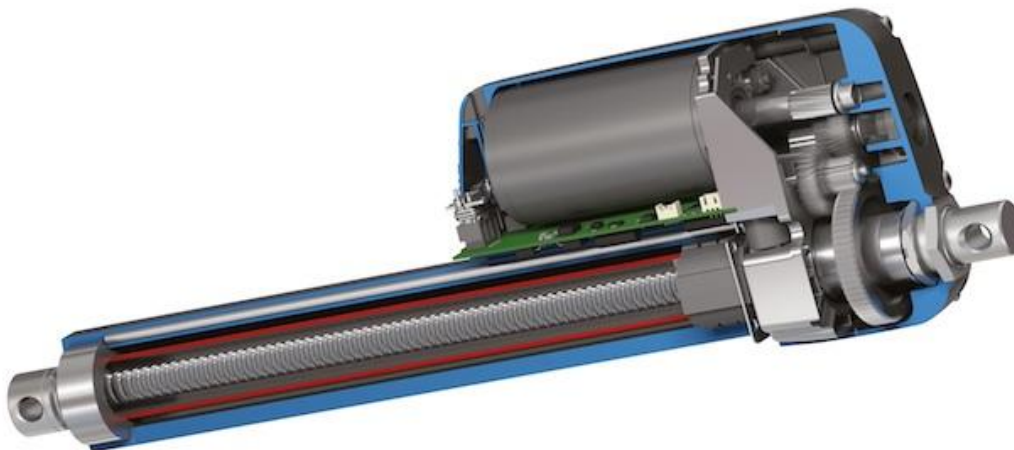
5.1.1 Pohonný prvek posuvu

Jako pohonný prvek posuvu byly zvažovány 2 možnosti:

- motor se šnekovou převodovkou,
- lineární aktuátor.

Při použití motoru se šnekovou převodovkou by se rovněž musela zkonstruovat mechanika umožňující lineární pohyb v ose z, neboť tento typ motoru je rotačního typu. Z tohoto důvodu je tedy z těchto dvou možností rozhodnuto o použití lineárního aktuátoru, a to z několika

důvodů. Hlavním důvodem je konstrukce tohoto pohonného prvku, jenž je rovněž v podstatě elektrickým motorem s převodovkou. Aktuátor však vytváří lineární pohyb pomocí zabudované šroubovice s maticí, naprostá většina lineárních aktuátorů je také vybavena rozpojovacími prvky na koncích rozsahu pro zastavení při maximálním vysunutí (a analogicky zasunutí). [18] Některé lineární aktuátory jsou již vybaveny enkodéry pro možnost řízení rychlosti a míry vysunutí (zasunutí), tyto typy aktuátorů se proto někdy nazývají lineárními servomotory. Ilustrační řez lineárním aktuátorem je zobrazen na obrázku 5.2.



Obr. 5.2 Ilustrační řez lineárním aktuátorem a pohled na vnitřní součásti, převzato z [19]

Na základě zadaných potřebných parametrů byl vytipován a vybrán typ masově vyráběného aktuátoru na stránkách portálu AliExpress.com. Jeho konkrétní specifikace popisuje tabulka 5.1.

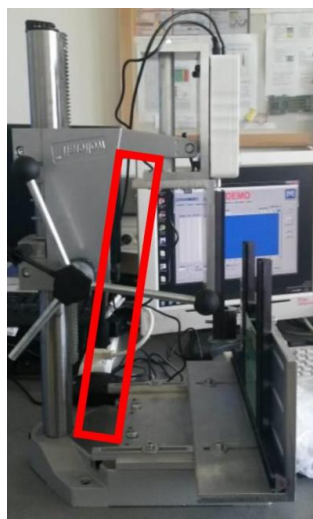
Tab. 5.1 Parametry zvoleného lineárního aktuátoru [19]

Tah (S)	Klidová rychlost	Síla	Napájení
200 mm	$4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	1500 N	12 VDC

Vzhledem k faktu, že prodejci na zmiňovaném serveru nabízí jednotlivé modely v pevně daných konfiguracích, nejde nezávisle na sobě vybrat jednotlivé parametry. Strojní náčrt tohoto aktuátoru je zobrazen v příloze B.1.

Klidová rychlost $4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ byla zvolena cíleně, neboť jako řízení rychlosti pohonu je plánováno užití pulzně šířkového modulátoru (dále jen PWM) připojeného na ovladač motoru. Vzhledem k tomu, že PWM je regulace typu on-off cyklus [21], nezpůsobuje pokles vyvíjecí síly. Realisticky se dá zpomalit motor až na 10 % klidové rychlosti bez ztráty parametrů. To by znamenalo aktivní rozsah rychlosti od $0,4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ po $4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, což je vyhodnoceno jako uspokojivé, neboť nejpodstatnější hodnotou je spodní hranice rychlosti. Pod touto hodnotou se však motor postupně začíná chovat jako cívka a procházející napájecí napětí více a více integruje, což není žádoucí.

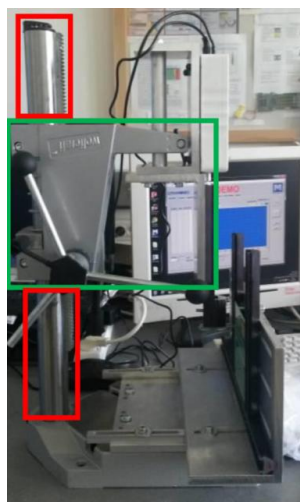
Uvažuje se, že aktuátor bude upevněn mezi ocelovou podstavu stojanu a vrchní ocelový díl stojanu určeného pro úchyt vrtačky, viz obrázek 5.3.



Obr. 5.3 Uvažované umístění lineárního aktuátoru do mechaniky posuvu, originální obrázek převzat z [16]

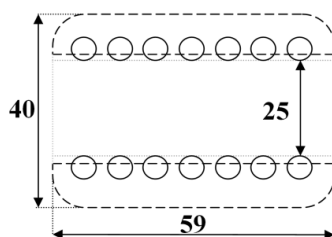
5.1.2 Konstrukční úprava mechaniky posuvu

Pro zajištění dostatečně hladkého a rovnoměrného průběhu chodu mechaniky posuvu, je nutné provést konstrukční změny stávající mechaniky. Vzhledem ke snaze zachování co možná největší části aktuální mechaniky stojanu na vrtačku, bylo navrženo nahradit tyč s ozubením, na níž je uchycen posuvný díl stojanu (viz obrázek 5.4) ocelovou hlazenou tyčí o průměru 25 mm.



Obr. 5.4 Mechanika posuvu, červeně označena tyč s ozubením, zeleně posuvný díl stojanu, originální obrázek převzat z [16]

Do posuvného dílu stojanu se vloží a upnou 2 válcová lineární kuličková ložiska zvolených rozměrů (viz obrázek 5.5) a celá konstrukce posuvného dílu se nasune na hlazenou ocelovou tyč. Toto řešení by mělo naprosto eliminovat drobné zasekávání aktuálního posuvu v pohybu, jež je způsobeno pohybem ozubeného kola po ozubení.

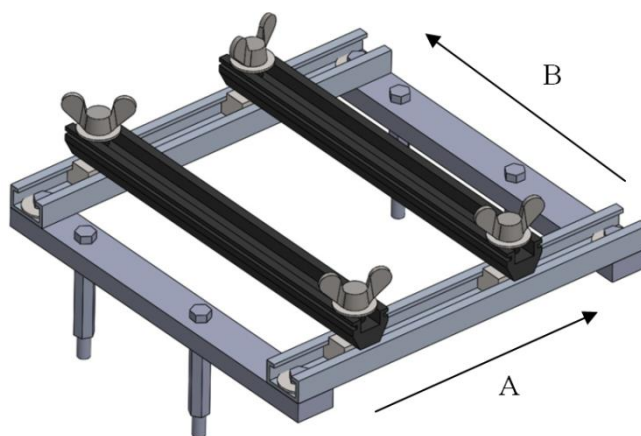


Obr. 5.5 Rozměry zvoleného válcového lineárního kuličkového ložiska

5.2 Návrh držáku DPS pro měření pevnosti v tahu

V programovém prostředí SolidWorks 2018 byl navržen nový držák pro upevnění zkoumaných DPS (viz obrázek 5.1). Vzhledem k rozhodnutí uchovat stávající ocelovou podstavu, je držák navržen tak, aby mohl být jednoduše jako komplet v případě potřeby přimontován do montážních otvorů. Držák umožní uchycení desky o maximálních rozměrech $A \times B = (125 \times 200)$ mm.

Jako konstrukční materiál byly vybrány volně dostupné čtyřhranné hliníkové plné profily, hliníkové profily tvaru C a speciální hliníkový upevňovací profil poskytnutý firmou SMTplus, spolu s odpovídajícím spojovacím materiálem (kameny do C profilu, šestihranné šrouby M5X20 a M6X20, podložky M5X20, závitové distanční sloupky M6X40, křídlové šrouby M10), viz obrázek 5.6. Výkresová dokumentace konstrukčně upravených profilů držáku je vyobrazena v přílohách B.2, B.3 a B.4.

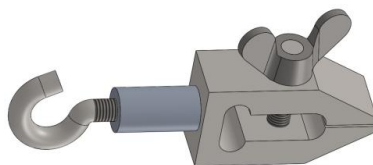


Obr. 5.6 Návrh konstrukce držáku na DPS pro měření pevnosti pájeného spoje v tahu

Držák umožní mnohem snadnější a rychlejší uchycení zkoumaných DPS, díky umožnění ručního upevnění pomocí křídlových šroubů. Uchycené DPS rovněž budou moci nyní být větší než dosud, také bude nyní možné mít zkoumané vývody v libovolnějších obrazcích, ne pouze v linii jako dosud. Celková manipulace s DPS při měření bude tímto řešením usnadněna.

5.2.1 Návrh úpravy hlavy na měření pevnosti pájeného spoje v tahu

Jako nejméně invazivní úprava celého hrotu pro měření pevnosti pájeného spoje se jeví výměna dosavadního utahovacího šroubu za křídlový a našroubování pomocí závitové dutinky na ocelový hák se závitem, viz obrázek 5.7.



Obr. 5.7 Ilustrační model návrhu úpravy hlavy na měření pájeného spoje v tahu

Tato měřicí hlava by se po upevnění vývodu zavěsila do hákové trhací hlavy přimontované k měřicímu kolíku siloměru. Křídlový šroub by poté umožňoval snadnější ruční dotažení.

Druhá varianta řešení je trhat vždy zdvojené vývody hákovým hrotem siloměru (viz kapitola 3.2) a utahovací svěrákový hrot nepoužívat, neboť při přílišném utažení vývodu svěrákem hrozí mechanické poškození vývodu, což by způsobilo nepřesnosti měření.

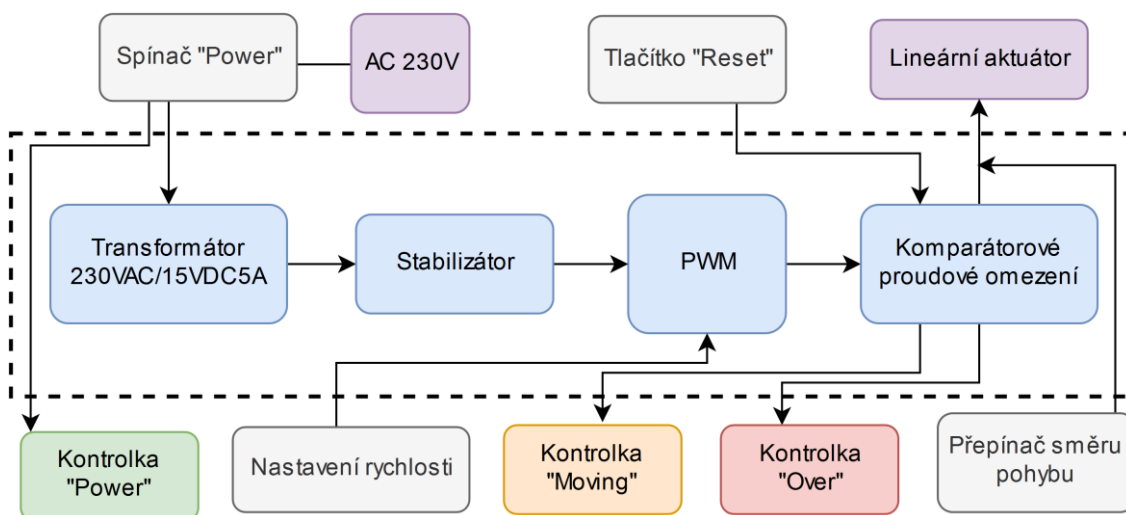
6 REALIZACE NÁVRHU

Bylo rozhodnuto o realizaci úpravy měřicí konfigurace tak, aby vzniklo poloautomatizované měřicí pracoviště vybavené motorizovaným posuvem řízeným elektronikou dle zamýšlené logiky přístroje, viz kapitola 4.2, následně navrhnout zapracování daného zařízení do laboratorní výuky předmětu na VUT FEKT UETE.

Bylo tedy nutné navrhnout a vyrobit snadno ovladatelnou elektronickou řídicí jednotku, vykonat strojní úpravy na mechanice celého zařízení a zařízení zkalibrovat z hlediska nastavení rychlosti a bezpečnostních omezení.

6.1 Řídicí jednotka PushPull V1.0

Řídicí jednotka zařízení je koncipována jako přístrojová krabice s ovládacími prvky na čelním panelu, jejíž hlavní funkcí je ovládání lineárního aktuátoru v posuvu zařízení. Elektronické uspořádání řídicí jednotky popisuje blokové schéma na obrázku 6.1, přičemž středový přerušovaný obdélník označuje DPS a prvky na ní umístěné.

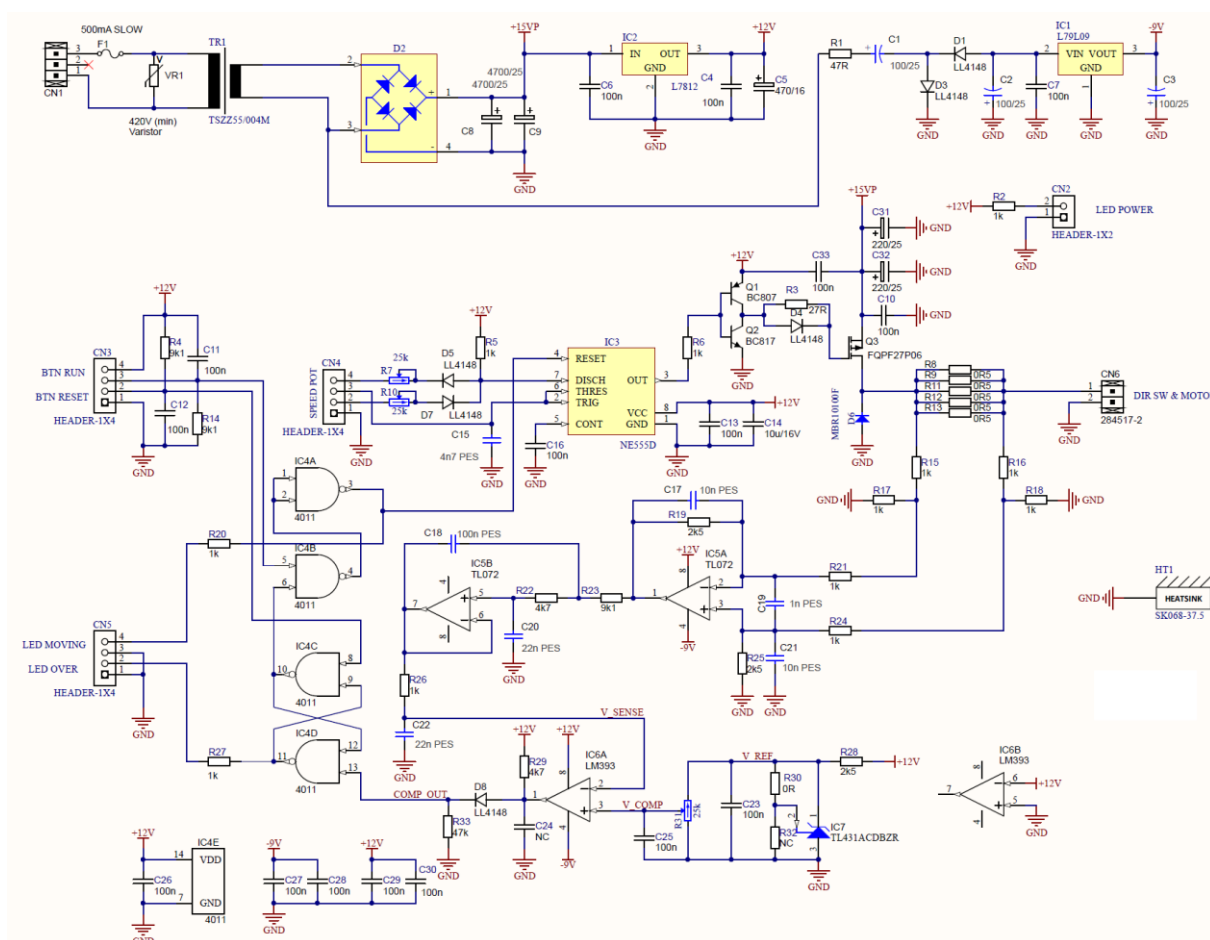


Obr. 6.1 Blokové schéma řídicí jednotky PushPull V1.0

Jak vyplývá z blokového schématu, rychlost lineárního aktuátoru je řízena pulzně šířkovou modulací, jejíž výstup prochází přes logiku obvodu zajišťující bezpečnostní vypnutí celého obvodu na základě proudového omezení výstupu. Celé zařízení je umístěno do černé plastové přístrojové krabice z materiálu ABS, hlavní ovládací prvky jsou umístěny na čelním panelu, vedlejší na zadním panelu, přičemž kabeláž je vyvedena dvěma průchodkami na kabely.

6.1.1 Schéma zapojení řídicího obvodu a návrh PCB

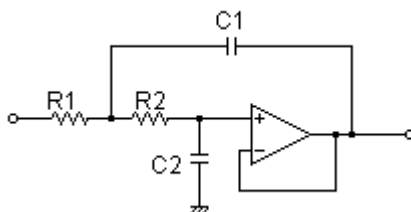
Schéma i návrh DPS byly vytvořeny v návrhovém prostředí Altium Designer. Schéma zapojení obvodu zařízení PushPull V1.0 je vyobrazeno na obrázku 6.2. Systém je tvořen stabilizovanou napájecí částí vstupující do obvodu PWM založeném na integrovaném obvodu 555. Nastavitelné rezistory R7 a R10 jsou přítomny kvůli kalibraci rychlostního rozsahu, zvýšením odporu lze omezit rozpětí nastavitelných hodnot z horní i dolní strany.



Obr. 6.2 Schéma zapojení elektroniky přístroje PushPull V1.0

Část obvodu umožňující vypnout zařízení při nastaveném odběru proudu motorem je realizována snímáním proudu z referenčních sense rezistorů (R8, R9, R11, R12, R13), signál se zesílí a projde filtrem druhého řádu typu Sallen-Key, výsledný signál z filtru je zaveden do komparátoru s nastavitelnou referencí pomocí nastavitelného rezistoru R31. Čím menší hodnota odporu je na trimru nastavena, tím bude vyšší hodnota vypínacího proudu a analogicky tedy přístroj vypne chod při vyšší vyvíjecí síle. Při proudovém odběru vyšším než je stanoven referencí se sepne logický klopný obvod a zařízení se vypne.

Hodnoty většiny pasivních součástek jsou dány katalogovými listy základních zapojení integrovaných obvodů či kvalifikovaným odhadem, výjimku tvoří filtr Sallen-Key. Jedná se o dolní propust druhého řádu, jejíž hodnota frekvence je nastavitelná pomocí výstupně vstupních pasivních součástek viz obrázek 6.3.



Obr. 6.3 Základní zapojení filtru typu Sallen-Key, převzato z [22]

Pro tuto aplikaci bylo nutné vypočítat hodnoty součástek pomocí udané mezní hodnoty frekvence. Tato frekvence se dá určit z frekvenční charakteristiky PWM s čítačem 555, přičemž v daném zapojení odpovídá 50 % pracovního cyklu frekvenci přibližně $f = 3\text{ kHz}$, z tohoto faktu jde odvodit, že plný pracovní cyklus odpovídá přibližně $f_f = 6\text{ kHz}$. Dostatečné filtrace u tohoto filtru lze dosáhnout na hodnotě pod 10 % této frekvence, udaná frekvence tedy byla zvolena na $f_u = 500\text{ Hz}$. Dále bylo potřeba určit kvalitativní faktor Q , jenž určuje velikost a výšku špičky frekvenční odezvy filtru. Pro tento účel byla zvolena hodnota $Q = 1$, používající se pro základní filtry tohoto typu. [23]

Hodnoty součástek se dají tedy určit pomocí vztahů pro výpočet mezní frekvence f_c (viz rovnice 6.1),

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (6.1)$$

a vztahu pro výpočet kvalitativního faktoru Q (viz rovnice 6.2).

$$Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{C_2(R_1 + R_2)} \quad (6.2)$$

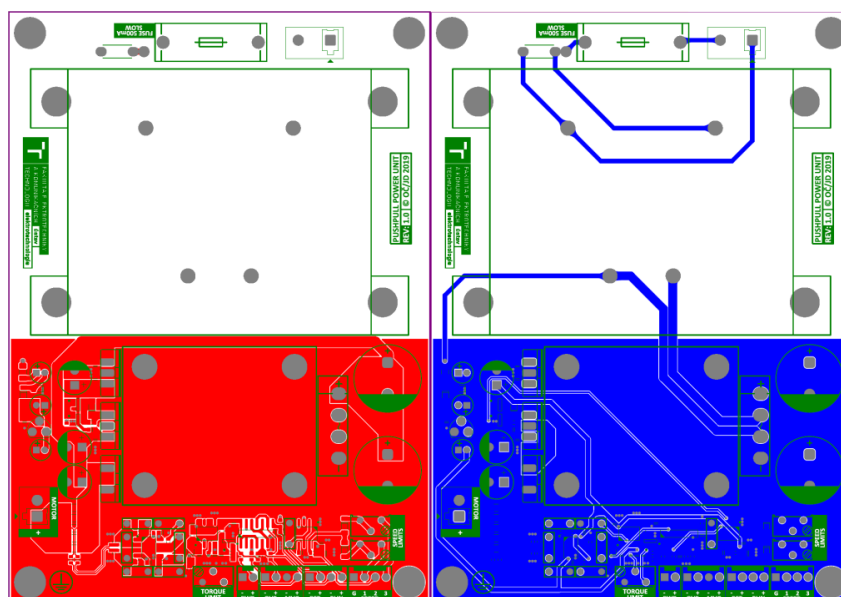
Výpočet touto cestou udá dvě rovnice o 4 neznámých. Je nutné proto zavést jednu z návrhových technik určení těchto hodnot. Z nichž častou metodou bývá metoda aproximování vztahu dvojice rezistorů a kondenzátorů vůči sobě. [24]

Pro tuto aplikaci bylo využito internetové kalkulačky zaměřené na určení hodnot těchto součástek z normované řady E24 pro rezistory a normované řady E6 pro kondenzátory a byly určeny hodnoty, viz tabulka 6.1.

Tab. 6.1 Hodnoty pasivních součástek pro filtr druhého řádu typu Sallen-Key

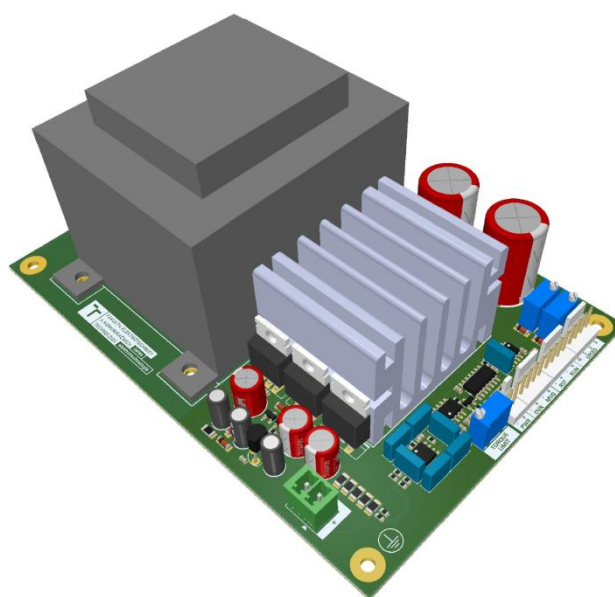
R_1 [k Ω]	R_2 [k Ω]	C_1 [nF]	C_2 [nF]
9,1	4,7	100	22

DPS byla navržena jako dvouvrstvá s kombinovanou montáží. Rovněž bylo rozhodnuto o umístění transformátoru přímo na DPS, díky čemuž se zařízení stane kompaktnějším, celková velikost DPS je $(10 \times 14)\text{ cm}$. Vzhledem k tepelnému vytížení součástek s pouzdry TO220 a usměrňovacího můstku, jsou tyto pouzdra umístěny na středovém uzemněném chladiči. Návrh horní (červená) a dolní (modrá) strany DPS je vyobrazen na obrázku 6.4.



Obr. 6.4 Horní (červená) a dolní (modrá) vrstva DPS řídící jednotky PushPull V1.0

Osazovací výkres a rozpiska součástek je umístěna v příloze A.3. Vizualizace osazené DPS vygenerovaná programem Altium Designer je zobrazena na obrázku 6.5.



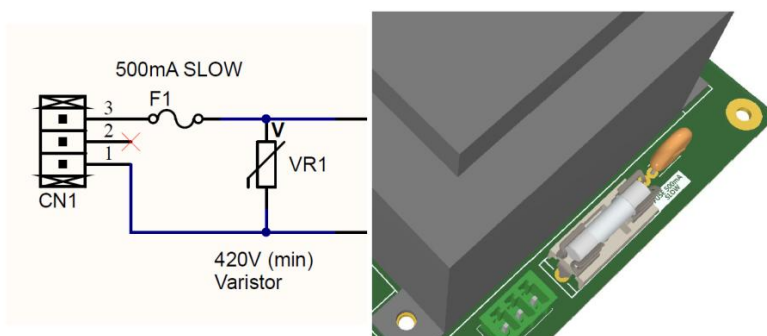
Obr. 6.5 Osazená DPS řídícího modulu zařízení PushPull V1.0

6.1.2 Bezpečnost a elektrická ochrana elektroniky

Zařízení je určeno k běžnému používání ve výuce a při vypracovávání závěrečných prací studenty, musí proto být bezpečné z hlediska rizika úrazu elektrickým proudem. Rovněž musí zařízení mít dostatečnou ochranu proti možnému přepětí a špičkovému proudu v síti.

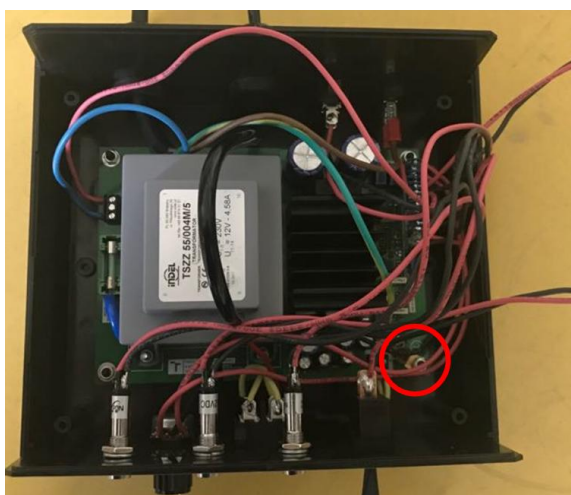
Jako elektrická ochrana proti přepětí byl zvolen varistor o hodnotě jmenovitého napětí $U_{AC} = 420 \text{ V}$ a elektrická proudová pojistka byla zvolena tavná pomalá skleněná pojistka o jmenovité hodnotě $I_f = 500 \text{ mA}$. Umístění těchto součástek ve schématu i na DPS ukazuje

obrázek 6.6.



Obr. 6.6 Elektrická ochrana zařízení ve schématu (vlevo) a na DPS (vpravo)

Elektrická bezpečnost zařízení je zajištěna standardní dvojí izolací přívodního kabelu, jenž je veden do přístrojové krabice pomocí dvou průchodek s pojistkou proti vytržení. Všechny žíly jsou připojeny konektorově pomocí svorkovnic a konektorů typu FAST-ON. Žíla kabelu PE je vyvedena v dvojnásobné délce oproti ostatním přívodním žilám a je připojena na zemnicí bod, jenž je umístěn v jednom z montážních otvorů DPS. Vnitřní kabeláž přístrojové krabice se zvýrazněným zemnicím bodem je vyobrazena na obrázku 6.7.



Obr. 6.7 Vnitřní kabeláž přístrojové krabice s vyznačeným zemnicím bodem

Přístroj má přímo v DPS umístěné kalibrační prvky, konkrétně nastavitelné rezistory R7, R10 a R31 (viz obrázek 6.2), které nejsou určeny k průběžné kalibraci, nýbrž k finálnímu nastavení přístroje. Krabice tedy není určena k libovolnému rozmontování a úpravě nastavených hodnot, na bočních stranách jsou tedy umístěny pečeti, viz obrázek 6.8.

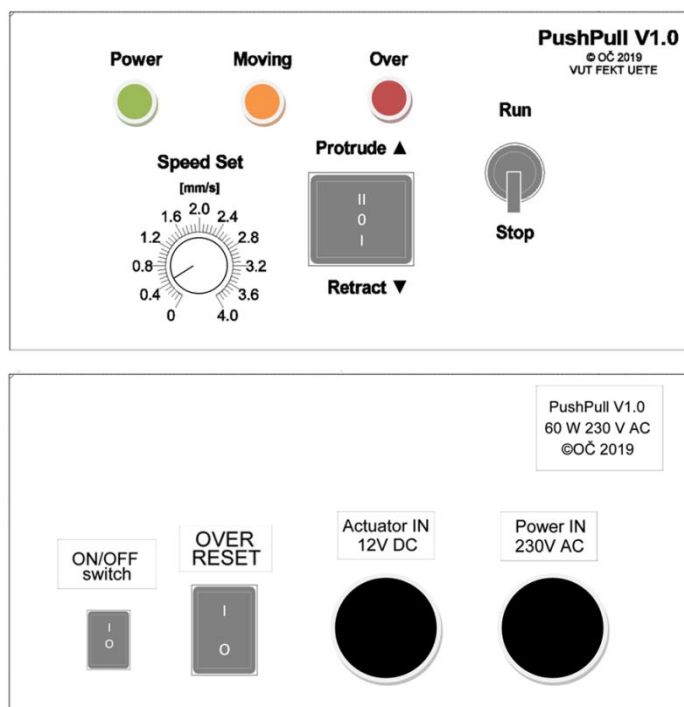


Obr. 6.8 Bezpečnostní pečeť na přístrojové krabice

Poškozením těchto pečeti a otevřením (rozšroubováním) přístrojové krabice na sebe pracovník bere plnou zodpovědnost za možnou následnou nefunkčnost zařízení.

6.1.3 Ovládací prvky a funkce

Přední panel obsahuje celkem 3 světlené kontrolky, 1 třípolohový kolébkový přepínač, 1 potenciometr a 1 páčkový spínač. Zadní panel poté obsahuje hlavní vypínač zařízení a spínač pro resetování stavu překročení proudového limitu. Pro přehledné vysvětlení všech funkcí je na obrázku 6.9 zobrazen přední a zadní panel zařízení.



Obr. 6.9 Přední panel (horní část) a zadní panel (spodní část) zařízení PushPull V1.0

Ovládací prvky předního a zadního panelu mají následující funkce:

- **Speed Set** – Otočný knoflík nastavení rychlosti chodu posuvu v rozmezí hodnot $0[0,4] - 4) \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Rychlost je nastavená sesouhlasením středu rysky knoflíku s ryskou na stupnici.
- **Protrude ▲/Retract ▼** – Třípolohový kolébkový přepínač určující směr pohybu aktuátoru. Protrude (anglicky *vyusunout*) reflektuje pohyb trhačího nože nahoru, retract (anglicky *zasunout*) reflektuje pohyb trhačího nože dolů. Zvolení střední polohy přepínače způsobí zastavení pohybu aktuátoru.
- **Run/Stop** – Páčkový spínač spouštějící chod aktuátoru. Poloha Run rozpohybuje trhačí mechaniku a poloha Stop ji uvádí do klidu. Tento přepínač se používá rovněž pro nouzové zastavení chodu přístroje.
- **ON/OFF Switch** – Hlavní vypínač celého zařízení.
- **OVER RESET** – Tlačítko vypínající kontrolku OVER, čímž odblokuje ovládací prvky přístroje.

Barevné LED kontrolky v horní části panelu reflektují následující situace:

- **POWER** – Indikuje, že zařízení je zapnuto. Rozsvěcí se sepnutím hlavního vypínače zařízení na zadním panelu.

- **MOVING** – Indikuje, že je páčkový spínač v poloze RUN. Zůstává rozsvícená, i pokud lineární aktuátor dojde do krajní polohy.
- **OVER** – Indikuje, že byl přesažen rozsah měřicího zařízení. Rozsvítí se také automaticky při sepnutí hlavního vypínače zařízení a při sepnutí chodu zařízení na hodnotě rychlosti vyšší než 1,6 mm/s. Tato vlastnost je záměrná, má upozornit pracovníka, že zvolil relativně vysokou rychlost, neboť náhlé (například nechtěně zaviněné) rozpohybování motoru může při špatném polohovém nastavení vzorku mít devastující důsledky. Kontrolka se resetuje stisknutím tlačítka OVER RESET na zadním panelu.

6.2 Kalibrace zařízení

Zařízení musí pracovat spolehlivě a dle stanovených hodnot. Důležité je pro spolehlivý chod hlavně pevně daný rozsah nastavitelných rychlostí a hodnota vyvíjecí síly, při které se motor zastaví.

Rychlost posuvu by bez jakéhokoliv omezení reflektovala teoreticky ($0 - 5,5$) $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, neboť napětový výstup z transformátoru není přesných $U = 12$ VDC, jeho maximální výtěžnost je vyšší (změřeno bylo přibližně $U = 15$ VDC). Přístroj by tedy nereflektoval danou stupnici na předním panelu. Z tohoto důvodu bylo nutné zavést možnost nastavení maximálního napětí (maximální rychlosti). Zařízení umožňuje nastavit rovněž minimální rychlost zařízení, tato funkce nakonec pro účely DP nebyla využita.

Bez proudového omezení motoru by motor při nárazu na vysoce tuhou překážku měl snahu působit nejvyšší možnou vyvíjecí silou. Vzhledem k faktu, že deklarovaná maximální hodnota působící síly výrobcem je mnohem vyšší než maximální rozsah siloměru (viz kapitola 2.1 a tabulka 5.1), vyvstala zde nutnost elektronicky omezit vyvíjecí sílu motoru. Toto omezení je realizováno nastavitelným referenčním rezistorem R31 (viz kapitola 6.1.1).

6.2.1 Kalibrace nastavení rychlosti

Vzhledem k nevyužití kalibrace spodní hranice rychlosti bylo nutné nastavit pouze horní mez na $4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Před nastavením referenčního odporu na DPS však bylo nutné provést měření linearitu potenciometru na předním panelu zařízení, tento potenciometr má výrobcem danou maximální hodnotu $R_{\max} = 50 \text{ k}\Omega$, je jednobodový s maximálním natočením $\Phi_{\max} = 300^\circ$ a jeho vzestup je lineární, měreno tedy bylo 5 hodnot na vzestupném úhlu natočení potenciometru. Toto ověření bylo provedeno pomocí postupného měření odporu na stolním multimetru a reflektuje jej tabulka 6.2.

Tab. 6.2 Měření linearitu vzestupu odporu na potenciometru nastavujícího rychlost

$\Phi [^\circ]$	Ideální hodnota [Ω]	Změřená hodnota [Ω]
0	0	0
75	12500	12484,1
150	25000	24897,7
225	37500	37668,1
300	50000	50127,5

Tabulka ověřuje, že potenciometr má dostatečně lineární vzestup elektrického odporu a je tedy možné použít lineárně vzrůstající popisovou stupnici na předním panelu. Na daný rozsah bylo nutné pomocí proměnného rezistoru R7 (viz obrázek 6.2) nastavit horní hranici rychlosti motoru a tím sesouhlasit reálné rychlosti posuvu s nastavovací stupnicí. Měření bylo provedeno pomocí měření doby, za kterou urazí trhací hlava dráhu $l = 10 \text{ cm}$ a následným přepočtem. Výsledky finálního nastavení shrnuje tabulka 6.3.

Tab. 6.3 Výsledky finálního nastavení rychlosti pomocí proměnného rezistoru R7

Počet otáček nastavitelného rezistoru R7:		$l = 100 \text{ mm}$
4		
Nastavená hodnota [mm·s ⁻¹]	Interval chodu [s]	Skutečná rychlost [mm·s ⁻¹]
0,4	257,07	0,389
0,8	126,42	0,791
1,2	83,82	1,193
1,6	62,89	1,590
2,0	50,05	1,998
2,4	41,51	2,409
2,8	35,57	2,811
3,2	31,08	3,217
3,6	27,54	3,631
4,0	24,40	4,099

Uvedené nastavení vykazuje zanedbatelnou odchylku danou nepřesnostmi panelového potenciometru a kalibračního nastavitelného odporu, tato odchylka však nebude mít vážný dopad na výsledky měření.

Ačkoliv je nastavovací potenciometr v rozsahu $(0 - 4) \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, parazitní vlastnosti aktuátoru omezují spodní rozsah pod $0,4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Motor má tak minimální rozběhovou rychlost přibližně $0,2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, doporučená minimální nastavená rychlost při měření je ale $0,4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

6.2.2 Kalibrace proudového omezení

Proudové omezení motoru musí být nastaveno takové, aby reflektovalo měřicí rozsah siloměru (viz kapitola 2.1). Kalibrace probíhala prvotním natočením nastavitelné odporové reference R31 do maximální hodnoty (nejnižší možný proud), kdy je kontrolka OVER neustále rozsvícená, posléze se reference upravovala po jedné otáčce na nastavitelné referenci, přičemž siloměrné čidlo tlačilo na pevnou podložku. Siloměrné čidlo vždy po zastavení přístroje udávalo hraniční hodnotu síly, která zastavení přístroje způsobila. Nastavitelná odpor

je lineárně vzrůstající otočný potenciometr s deseti otáčkami, přepočtem lze tedy získat výsledný proud referencí. Tímto způsobem se přístroj postupně nastavil na výsledné omezovací hodnoty, které shrnuje tabulka 6.4.

Tab. 6.4 Nastavené hodnoty maximálních rozsahů pomocí proudového omezení aktuátoru

Síla zastavení při pohybu trhací hlavy směrem dolů [N]	Síla zastavení při pohybu trhací hlavy směrem nahoru [N]	Počet otáček na referenčním potenciometru (z počátku) [-]	Odpor nastavené reference [kΩ]
499,5	472,5	6,5	16,25

Síla zobrazovaná pomocí siloměrného čidla není stejná v obou pohybech, jelikož při pohybu mechaniky směrem nahoru vytlačí lineární aktuátor rovněž mechanickou zátěž části měřicí soustavy, jenž se od výsledné síly na siloměru odečítá, což způsobí daný rozdíl. Nepředpokládá se však, že by se v rozsahu $F > 450 \text{ N}$ cíleně měřilo, proto je výsledná kalibrace omezení přístroje zcela vyhovující.

6.3 Vylepšení posuvné mechaniky

Nevyhovující mechanika založená na principu pohybu ozubeného kola po tyči s ozubeným vedením (viz kapitola 5.1.2) byla nahrazena vysoustruženou speciální hlazenou osou s upevňovací patkou. Do posuvné mechaniky byly upnuty dvě lineární ložiska, tato základní konstrukce je vyobrazena na obrázku 6.10.



Obr. 6.10 Lineární ložiska upnuté do části těla původní mechaniky

Takto vyřešené vedení zaručuje hladký posuv v ose z, avšak rovněž vychylování v osách x a y. Z tohoto důvodu bylo nutné zakomponovat přídatné lineární vedení pro zvýšení tuhosti celého posuvu. Bylo zvažováno přidání dalších dvou hlazených os s lineárními ložisky ve vozících, jež by se přišroubovaly k posuvnému tělu měřidla. Toto řešení však z hlediska velmi obtížného soustružení nebylo vhodné. Na podstavě rovněž nezbývalo příliš prostoru pro tyto

poměrně obsáhlé úpravy.

Přistoupilo se tedy ke strojní úpravě vodící osy, do níž byla vysoustružena rovnoběžná vodící drážka (viz strojní výkres v příloze B.5). V této drážce se pohybuje svěrák lineárního vedení s přesností lícování H8/h7. Toto velmi přesné smykové lícování eliminovalo vychylování v osách X a Y díky tuhosti celé upínací mechaniky. Tento svěrák je vyobrazen na obrázku 6.11 a jeho strojní výkres je vyobrazen v příloze B.6.



Obr. 6.11 Svěrák lineárního vedení na těle posuvné části přístroje

Vyztužena byla rovněž trhací hlava. Na úhelník, který ji podpírá, byly umístěny dva záchytné šrouby, které zamezí případnému nežádoucímu smyku a ohnutí hlavy do stran při nesprávném měření, viz obrázek 6.12.



Obr. 6.12 Vyztužený trhací hlavy proti případnému ohybu do stran

6.3.1 Konečná podoba pracoviště na měření pevnosti pájeného spoje

Na konečném pracovišti se tedy nachází řídicí poloautomatizovaná řídicí jednotka posuvu PushPull V1.0, mechanika s měřidlem MARK-10 M5-100 a počítač se sběrným a vyhodnocovacím programem MESURgauge, viz obrázek 6.13. Celá mechanika je sama sobě dostatečně stabilní, podstavec nicméně umožňuje případné šroubové uchycení přístroje k pevné podložce.

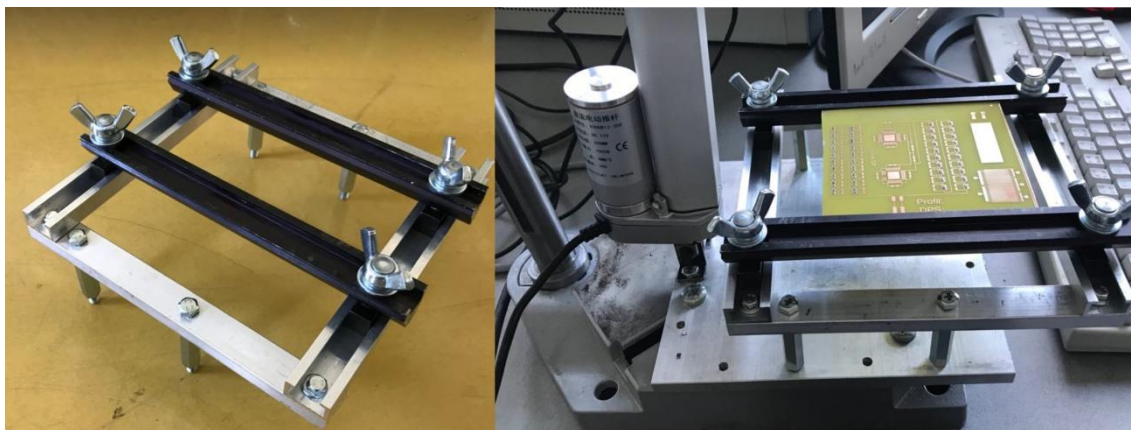
V momentální době není pracoviště pevně umístěno, avšak zvažuje se jeho umístění do laboratoře 1.63 v budově Technická 10.



Obr. 6.13 Konečná podoba pracoviště na měření pevnosti pájeného spoje

6.4 Držák na DPS pro měření pevnosti pájeného spoje v tahu

Dle návrhu a výkresové dokumentace v kapitole 5.2 byl rovněž vyroben držák na DPS pro měření pájeného spoje v tahu, viz obrázek 6.14.



Obr. 6.14 Zkonstruovaný držák na DPS pro měření pájeného spoje v tahu

Držák umožňuje jednoduché upnutí i možnost výměny měřeného vzorku DPS pomocí křídlatých šroubů, bez nutnosti jakkoliv dále modifikovat strukturu držáku. Ačkoliv držák umožňuje upnutí desky o maximálních rozměrech $A \times B = (125 \times 200)$ mm, použití vzorků velkého rozměru A by způsobilo nežádoucí průhyb DPS a zkreslení výsledků. Doporučuje se tedy používat desky s rozměrem $A \leq 30$ mm, pro co nejefektivnější omezení prohýbání měřené desky plošných spojů.

Trhací hlava je navíc vůči desce nepohyblivá v osách X a Y , použití desky s velkým rozměrem A by tedy znamenalo nutnou koncentraci měřených spojů do téměř jednoho bodu. Ideální vzorek by tedy měl mít přibližně rozměry $A \times B = (30 \times 150)$ mm, což zajistí obsluhu vhodných manipulačních možností.

6.4.1 Uchycení vývodů pro měření pevnosti pájeného spoje v tahu

Jak je z výsledků podkapitol kapitoly 3.2 zřejmé, kvalitně zapájený THT spoj je mnohem pevnější než měděný vývod, což vede k přetržení v těle vodiče. Zdroj dokonce uvádí, že celý spoj je v součtu pevností jednotlivých částí pokoveného otvoru (za předpokladu zvolení vhodného mezikruží) o 139,9 % pevnější než vývod. [25]

Rovněž uvádí, že pevnost pájeného spoje vyjádřená pomocí jednotky tlaku je po přepočtu $p = 51,214 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Za předpokladu, že pájený spoj má tedy plochu menší než

$$S_{ps} = (\text{rozsah měřicího přístroje})/p = 500/51,214 = 9.76 \text{ mm}^2, \quad (6.4.1.1)$$

by se za použití dostatečně tuhého materiálu vývodu dala tato hodnota změřit na vytvořeném pracovišti. Problém je však ve vyvinutí dostatečně silného upínáku pro tyto vývody, jelikož by se musely v návrhu zmíněném v kapitole 5.2.1 upínat ručně. Takovéto řešení není pro měřicí soustavu vhodné.

Logickým řešením je tedy měřit na pracovišti pevnosti pájených spojů v tahu pouze u vývodů zapájených natupo na dvou ploškách (vývod vytvarován do tvaru písmene U podobně jako v kapitole 3.2.2). Jako trhací hlava by se poté zvolil originální hákový nástavec (viz obr. 3.3). Pro snadnější upnutí do přístroje se jako středový kus dá použít pevný ocelový kovový hák, jenž se na jedné straně zavěsí za hákovou hlavu a z druhé strany provleče mezerou v zapájeném vývodu, viz obr. 6.15.



Obr. 6.15 Hákový středový kus pro měření pájeného spoje v tahu.

7 OVĚŘENÍ FUNKCE ZAŘÍZENÍ

Zkonstruované a nekalibrované zařízení bylo ověřeno z funkčního hlediska. Pro tyto funkční zkoušky byly vyrobeny 4 vzorky DPS se zapájenými součástkami velikosti 0805. Dvě z těchto desek byly zapájeny pastou SnBi a dvě pastou SAC305.

Tyto součástky byly změřeny na vytvořeném pracovišti a výsledky těchto měření byly vyhodnoceny z hlediska srovnání grafických průběhů měření s průběhy naměřenými na předchozím pracovišti s manuálním ovládáním. Stejně vzorky byly rovněž změřeny na pracovišti určeném pro měření pevnosti nejen pájených spojů s profesionálním microbond testerem DAGE PC2400 na Ústavu Mikroelektroniky FEKT VUT, viz obrázek 7.1. DAGE PC2400 bylo nastaveno na následující hodnoty [26]:

- | | |
|--|--|
| • výška hrotu od substrátu při testu: | $100 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, |
| • rychlost posuvu hrotu při testu: | $16,7 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, |
| • vzdálenost, kterou ujede hrot po utrnutí součástky: | $500 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, |
| • rozsah měření: | 150 N, |
| • procentní pokles z max. hodnoty, kdy se test ukončí: | 20%, |
| • destruktivní test. | |



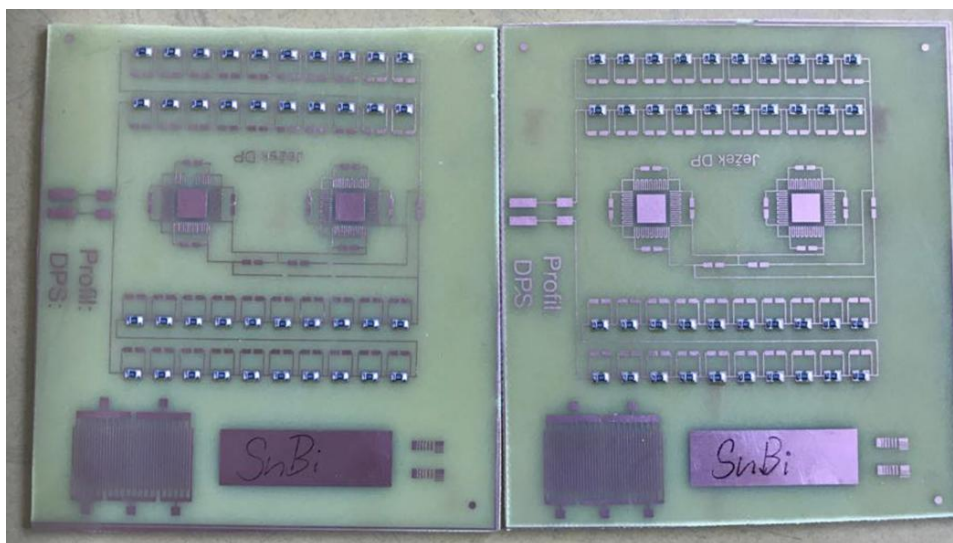
Obr. 7.1 Pracoviště s microbondtesterem DAGE PC2400

Naměřené výsledky z tohoto profesionálního zařízení následně byly porovnány s výsledky měření získané z vytvořeného nového pracoviště.

Experimentálně byly rovněž změřeny součástky s odlišnými velikostmi pouzder (0603 a 1206) na profesionálních deskách připájených různými slitinami, kde bylo cílem určit, zda je nové pracoviště vhodné pro měření větších či menších pouzder SMD součástek než je velikost 0805.

7.1 Vzorky se součástkami SMD 0805 zapájenými slitinou SnBi

V laboratoři ProtoCAD byly vyrobeny testovací DPS, na které bylo pomocí šablony natisknuto definované množství pájecí pasty SnBi. Desky byly osazeny součástkami (keramické nulové odpory) s pouzdry velikosti 0805 (v mikropalcové míře). viz obrázek 7.2. Vzorky jsou bez povrchové úpravy.



Obr. 7.2 Vzorky DPS se součástkami SMT 0805 zapájenými slitinou SnBi

Vzorky byly zapájeny v průběžné pájecí peci DIMA s následujícím nastaveným teplotním profilem:

- teplota předehřevu: 200 °C,
- teplota spodního ohřevu: 180 °C,
- teplota horního ohřevu: 300 °C,
- rychlost dopravníku: 14.

Rychlost posuvu na řídicí jednotce PushPull V1.0 byla u všech měření nastavena na rychlost $v = 0,4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. A výška hrotu od DPS byla mikrometrem určena 0,1 mm.

7.1.1 Srovnání výsledků SMT 0805 SnBi s výsledky přístroje DAGE

Přístroj DAGE PC2400 neumožňuje vykreslení grafu průběhu vyvíjené síly na součástku v čase, po utrnutí součástky zobrazí pouze výslednou hodnotu pevnosti pájeného spoje. Porovnány budou tedy průměrné hodnoty pevností a směrodatné odchylky změřené na upraveném přístroji s výsledky z přístroje DAGE PC2400. Z 20 měření byl vybrán statistický vzorek 10 měření, přičemž při výběru byly vyřazeny chybné měření a byly vybrány měření s nejmenší odchylkou vůči sobě navzájem, pro co největší přesnost posouzení. Výsledky shrnuje tabulka 7.1.

Tab. 7.1 Srovnání výsledků měření pevnosti pájeného spoje u součástek 0805 SnBi s DAGE PC2400

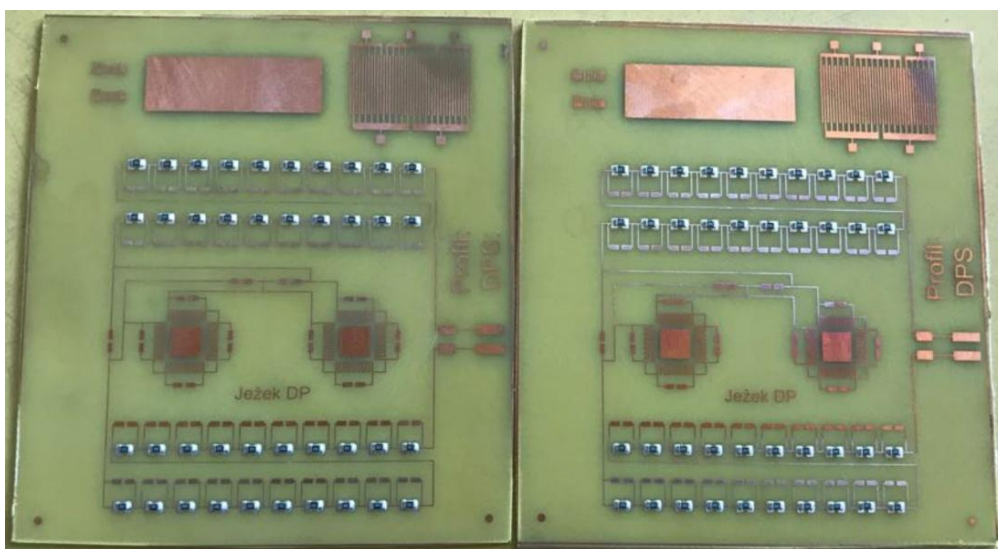
Slitina	DAGE PC2400	Zařízení s PushPull V1.0
SnBi	F [N]	F [N]
Výška hrotu od DPS: 0,1 mm	55,37	57,5
	51,33	51,7
	46,33	54,1
	45,69	51,6
	51,28	59,5
	45,08	58,3
	53,44	51,1
	55,2	73,0
	50,96	68,0
	51,13	54,5
Průměr [N]:	50,58	57,93
σ_F [N]:	3,55	6,95
Chybných měření (z 20):	0	4

Měřicí zařízení s elektronickou výbavou PushPull V1.0 se v porovnání průměrů odchýlilo od přístroje DAGE PC2400 o $\Delta F = 7,35 \text{ N}$, což představuje procentuální

odchylku 14,5 %. Tato hodnota je vzhledem k velmi odlišné rychlosti pohybu trhačí hlavy obou zařízení uspokojující. Přibližně dvojnásobná je potom směrodatná odchylka měření, kdy se zařízení PushPull V1.0 vyznačuje vyšším rozptylem hodnot. Pojem „chybné měření“ označuje situaci, kdy je trhačí hlava špatně nastavena vůči součástce a začne například tlačit více na jeden ze dvou menisků, případně je opřena o DPS a začne se o ni třít. Toto tření je způsobeno špatným nastavením kolmosti DPS vůči trhačí hlavě. Systém DAGE PC2400 má integrovanou funkci, která tření o povrch DPS zabraňuje.

7.2 Vzorky se součástkami SMD 0805 zapájené slitinou SAC305

V laboratoři ProtoCAD byly vyrobeny testovací DPS, na které bylo pomocí šablony natisknuto definované množství pájecí pasty SnBi. Desky byly osazeny součástkami (keramické nulové odpory) s pouzdry velikosti 0805 (mikropalcová míra), viz obrázek 7.3. Vzorky jsou bez povrchové úpravy.



Obr. 7.3 Vzorky DPS se součástkami SMT 0805 zapájenými slitinou SAC305

Vzorky byly zapájeny v průběžné pájecí peci DIMA s následujícím nastaveným teplotním profilem:

- teplota přehřevu: 300 °C,
- teplota spodního ohřevu: 300 °C,
- teplota horního ohřevu: 400 °C,
- rychlost dopravníku: 12.

Rychlost posuvu na řídicí jednotce PushPull V1.0 byla u všech měření nastavena na rychlost $v = 0,4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. A výška hrotu od DPS byla mikrometrem určena 0,1 mm.

7.2.1 Srovnání výsledků SMT 0805 SAC305 s výsledky přístroje DAGE

Jak již bylo zmíněno v kapitole 7.1.1, přístroj DAGE 2400 neumožňuje vykreslování grafů, předmětem srovnání tedy budou průměrné hodnoty pevností a směrodatné odchylky změřené na upraveném přístroji s výsledky z přístroje DAGE PC2400. Z 20 měření byl opět vybrán statistický vzorek 10 měření, přičemž při výběru byly vyřazeny chybné měření a byly vybrány

měření s nejmenší odchylkou vůči sobě navzájem, pro co největší přesnost posouzení.

Tab. 7.2 Srovnání výsledků měření pevnosti pájeného spoje u součástek SMD 0805 SAC305 s DAGE PC2400

Slitina SAC305	DAGE PC2400	Zařízení s PushPull V1.0
	F [N]	F [N]
Výška hrotu od DPS: 0,1 mm	54,27	59,4
	75,49	57,5
	61,72	74,2
	54,13	66,1
	53,95	59,3
	55,40	61,6
	61,58	74,7
	50,63	59,9
	64,02	51,3
	75,91	53,4
Průměr [N]:	60,71	61,74
σ_F [N]:	8,50	7,44
Chybných měření (z 20):	0	2

Měřicí zařízení s elektronickou výbavou PushPull V1.0 se v porovnání průměrů odchýlilo od přístroje DAGE PC2400 o $\Delta F = 1,03$ N, což představuje procentuální odchylku 1,7 %. Vyšší rozptyl tentokrát jevíly hodnoty naměřené na přístroji DAGE PC2400, rozdíl ve směrodatných odchylkách je však minimální ($\Delta\sigma_{F1-F2}=1,06$ N). Výsledné porovnávané hodnoty byly tak u obou přístrojů téměř totožné.

Výsledky měření jsou velmi uspokojující, i přes nižší rychlost posuvu trhačí hlavy přístroje DAGE PC2400 jsou naměřené výsledky srovnatelné.

7.3 Srovnání výsledků poloautomatizovaného měření s výsledky ručního měření

Hlavní problém předchozího manuálního měřicího zařízení byla neopakovatelnost měření díky nekonstantní rychlosti posuvu a analogicky tedy nedefinovatelnému nárůstu vyvíjecí síly. Řídící jednotka PushPull V1.0 pohybuje trhačí hlavou lineárně, což tento problém řeší.

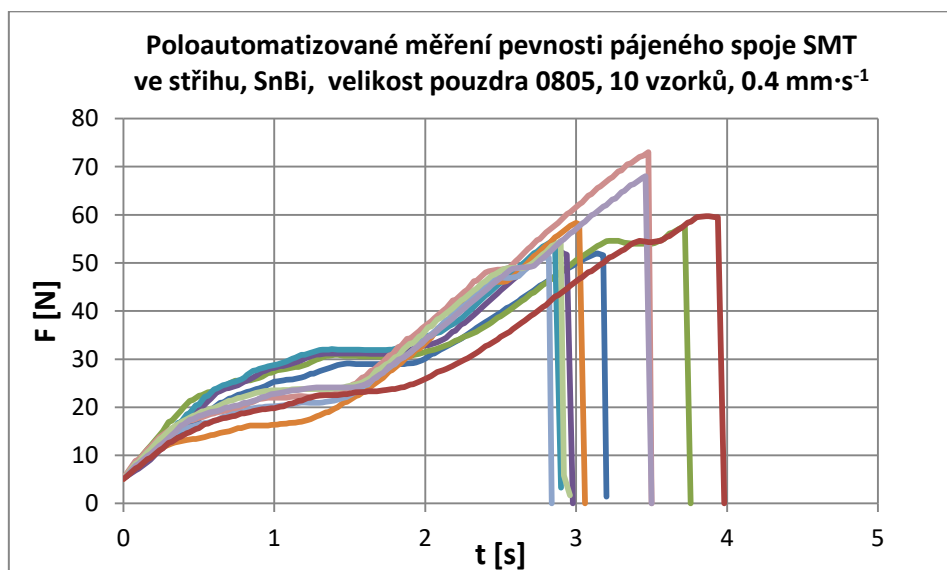
Je důležité porovnat vzorky z hlediska špičkové hodnoty síly, kdy dojde k přetržení spoje a z hlediska grafických průběhů těchto měření, kdy by hodnoty naměřené pomocí motorizovaného posuvu měly jevit větší překryv přes sebe. Ideálně by tyto grafické průběhy měly vykazovat i oblast, kdy chvilkově nedochází ke změně síly, neboť pájený spoj vykazuje

jev tečení. K porovnání bude sloužit stejný statistický vzorek jako v kapitolách 7.1.1 a 7.2.1. Srovnání naměřených hodnot přetržení poloautomatizovaným zařízením s hodnotami naměřenými manuálním zařízením je popsáno tabulkou 7.3.

Tab. 7.3 Srovnání měření poloautomatizovaným zařízením s měřením manuálním zařízením

	SnBi ručně	SnBi poloautomat	SAC305 ručně	SAC305 poloautomat
	F [N]	F [N]	F [N]	F [N]
	85,1	57,5	80,3	59,4
	92,7	51,7	92,7	57,5
	79,9	54,1	79,9	74,2
	79,6	51,6	X	66,1
	94,7	59,5	79,6	59,3
	94,8	58,3	94,7	61,6
	99,6	51,1	94,8	74,7
	86,0	73,0	115,2	59,9
	X	68,0	86,0	51,3
	105,6	54,5	105,6	53,4
Průměr [N]:	91,0	57,93	92,1	61,74
σ_F [N]:	8,37	6,95	11,60	7,44

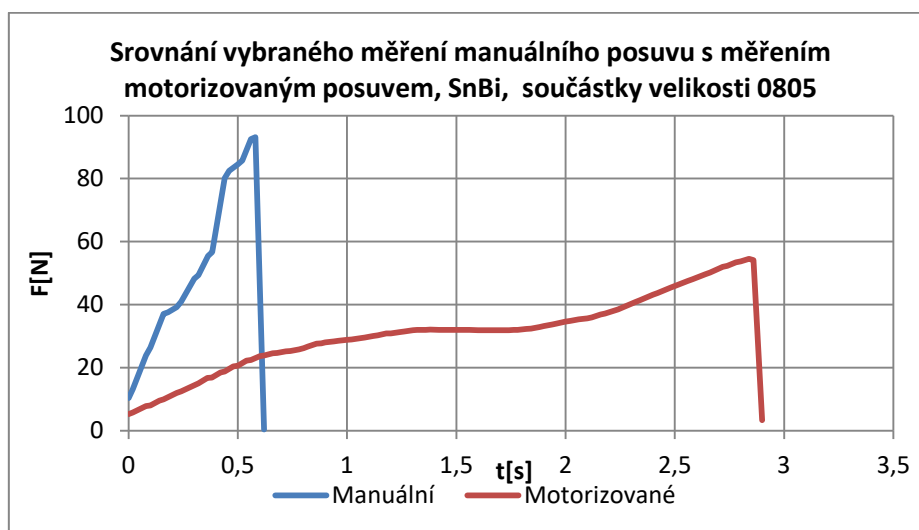
Tabulka ukazuje procentuální odchylku průměrné hodnoty manuálního měření od měření poloautomatizovaného u součástek zapájených pastou SnBi 57,1 %. U pasty SAC305 je daná odchylka rovna 49,2%. Směrodatná odchylka byla v obou případech vyšší u měření provedených ručně. Rozdíl výsledků měření je tak značný, poloautomatizované měření je nejen vyšší přesnost (viz srovnání s výsledky profesionálního zařízení v kapitolách 7.1.1 a 7.2.1), ale také menší rozptyl hodnot.



Obr. 7.4 Poloautomatizované měření pevnosti pájeného spoje SMT ve střihu, SnBi, SMD 0805

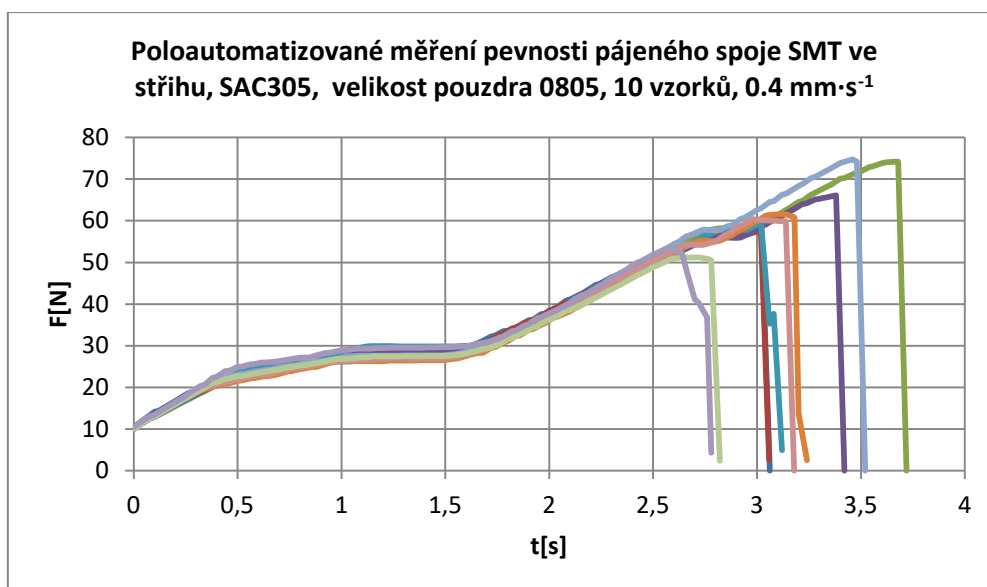
Při porovnání grafických průběhů působící síly v čase proběhne srovnání průběhů statistického vzorku měření jednotlivých slitin s grafickými průběhy manuálního měření. V případě manuálního měření se slitinou SnBi se jedná o graf na obrázku 4.1 a v případě měření se slitinou SAC305 o přílohu A.6. Grafické průběhy poloautomatického měření pevnosti pájeného spoje se slitinou SnBi jsou zobrazeny v obrázku 7.4.

Při srovnání grafu na obrázku XX s grafem na obrázku 4.1, jde na první pohled vidět větší překryv jednotlivých průběhů měření přes sebe. Díky definované klidové rychlosti posuvu trhací hlavy $v=0,4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ se nyní na průběhu jednotlivých měření projevuje oblast tečení spoje, která nastala u měřených vzorků v rozmezí $F \approx (15; 30) \text{ N}$, posléze dochází ke zpevnění, nárůstu síly a utržení součástky. Pro lepší názornost srovnání průběhu síly v čase u poloautomatizovaného a manuálního pracoviště, ukazuje obrázek 7.5 srovnání vybraného průběhu jednoho vzorku z obou měření.



Obr. 7.5 Srovnání vybraného měření manuálního posuvu s měřením motorizovaným posuvem, SnBi, velikost součástek 0805

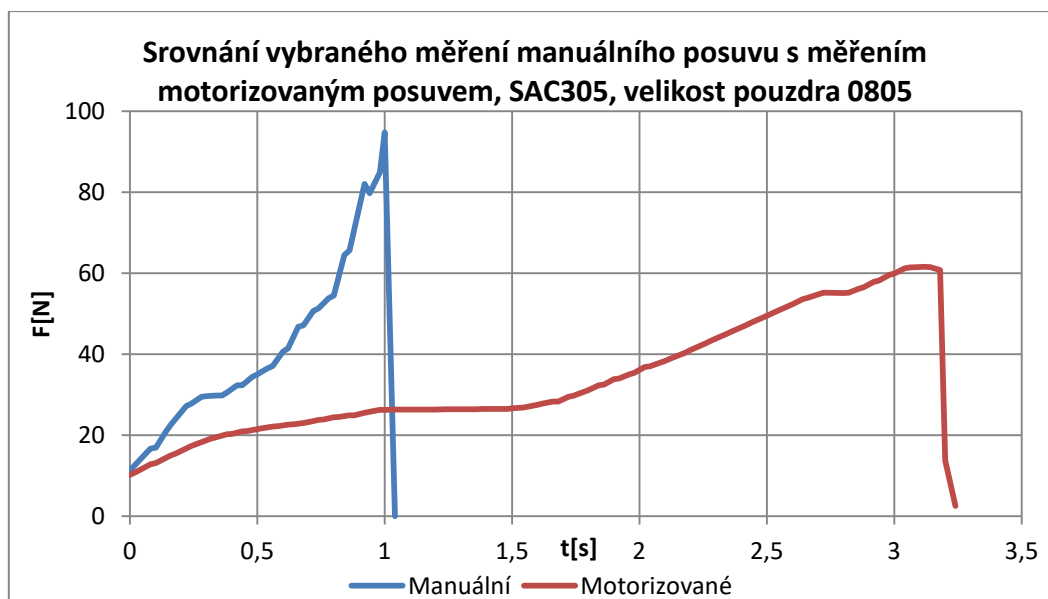
Graf na obrázku 7.6 ukazuje průběhy měření pevnosti pájených spojů zapájenými slitinou SAC305.



Obr. 7.6 Poloautomatizované měření pevnosti pájeného spoje SMT ve stříhu, SAC305, SMD 0805

Průběhy jednotlivých měření na obrázku 7.6 je u slitiny SAC305 v porovnání s grafem na obrázku 7.4 ještě výraznější. Výraznější rozdíl jednotlivých průběhů tedy tkví u vzorků zapájených SAC305 v hodnotě síly, při které dojde k utržení součástky. Vzorky byly opět měřeny při definované rychlosti posuvu trhačí hlavy $v=0,4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. V grafu se u všech měření opět projevila oblast tečení spoje, která nastala u měřených vzorků v rozmezí $F \approx (15; 30) \text{ N}$.

Při porovnání grafu na obrázku 7.6 s grafem v příloze A.6 lze na první pohled rozeznat lepší překryv jednotlivých měření. Opět pro lepší názornost srovnání průběhu síly v čase u poloautomatizovaného a manuálního pracoviště, ukazuje obrázek 7.7 srovnání vybraného průběhu jednoho vzorku z obou měření.



Obr. 7.7 Srovnání vybraného měření manuálního posuvu s měřením motorizovaným posuvem, SAC305, SMD 0805

Z uvedených měření a srovnání lze vyvodit, že úprava zařízení pomocí řízeného motorizovaného posuvu v ose z nyní díky konstantní nastavitelné rychlosti umožňuje provádět opakovatelná a více reprodukovatelná měření.

7.4 Testovací měření vzorků profesionálních desek

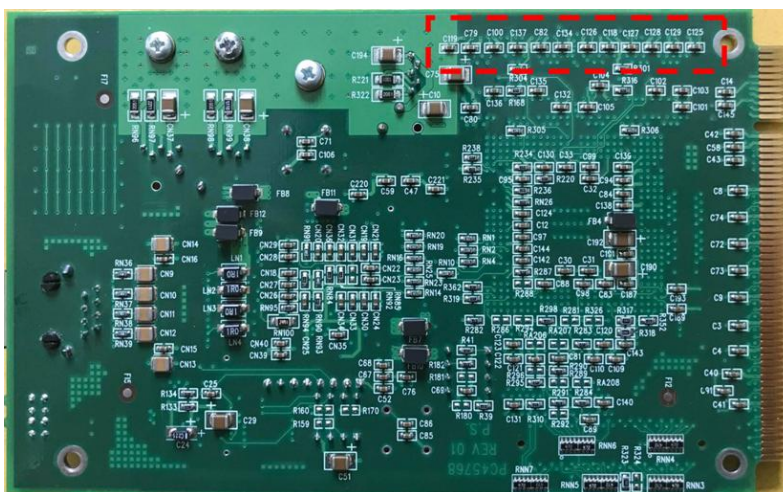
Jako poslední typ ověřovacího měření bylo zvoleno změřit pevnosti pájených spojů keramických SMD součástek velikosti 0603 a 1206 (mikropalcová míra). Toto měření je prováděno za cílem ověřit, zda je přístroj vhodný pro měření menších a větších součástek než předem testovaná velikost 0805.

Pro toto měření byly vybrány dva vzorky DPS, přičemž použitá pájecí slitina je u obou desek jiná. V případě vzorku DPS se zkoumanými součástkami velikosti 0603 byla použita pájecí slitina SnPb a v případě vzorku DPS se zkoumanými součástkami velikosti 1206 byla použita pájecí slitina typu SAC.

Vzorky DPS pochází z anonymních firem, zabývajících se profesionální výrobou elektroniky včetně osazení DPS. Povrchová úprava vzorků se součástkami velikosti 0603 je HAL a povrchová úprava vzorků se součástkami velikosti 1206 je ENIG, oba vzorky jsou zapájeny přetavením.

7.4.1 Vzorek DPS se součástkami SMD velikosti 0603 zapájené slitinou SnPb

Vzorek určený pro měření pevnosti pájeného spoje součástek velikosti 0603 (mikropalcová míra) zapájený slitinou SnPb s vyznačenou oblastí měření je vyobrazen na obrázku 7.8.

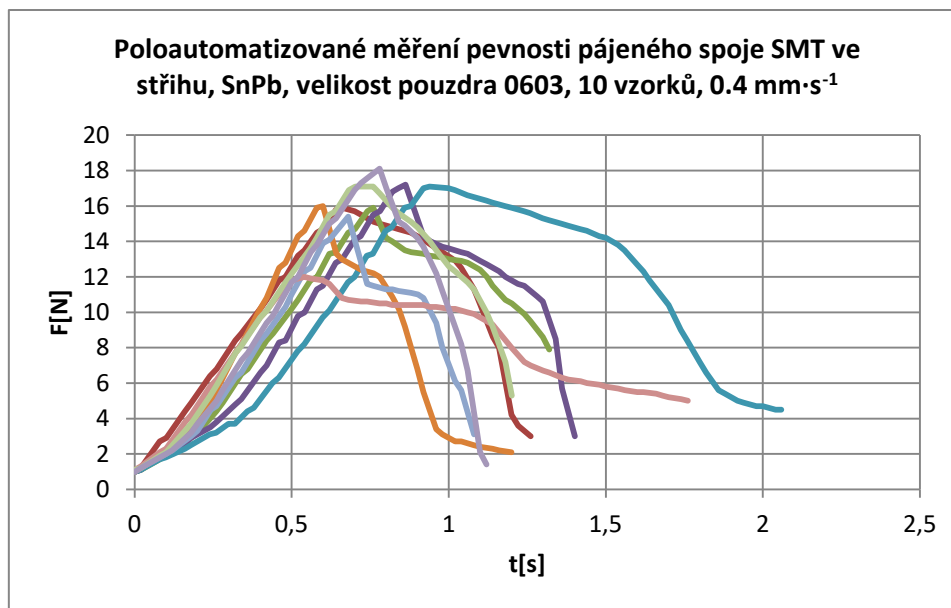


Obr. 7.8 Vzorek DPS se součástkami SMT 0603 zapájenými slitinou SnPb

Bylo provedeno 10 měření, srovnání naměřených hodnot pevností pájeného spoje těchto měření je shrnuto v tabulce 7.4. Průběhy sil v čase jednotlivých měření poté shrnuje graf na obrázku 7.9.

Tab. 7.4 Měření pevnosti pájeného spoje DPS se součástkami SMT 0603, SnPb

Slitina SnPb	PushPull V1.0
	F [N]
Výška hrotu od DPS: 0,1 mm	15,10
	15,90
	15,70
	17,20
	17,10
	16,00
	15,40
	12,00
	18,10
	17,10
<hr/>	
Průměr [N]:	15,96
σ_F [N]:	1,60

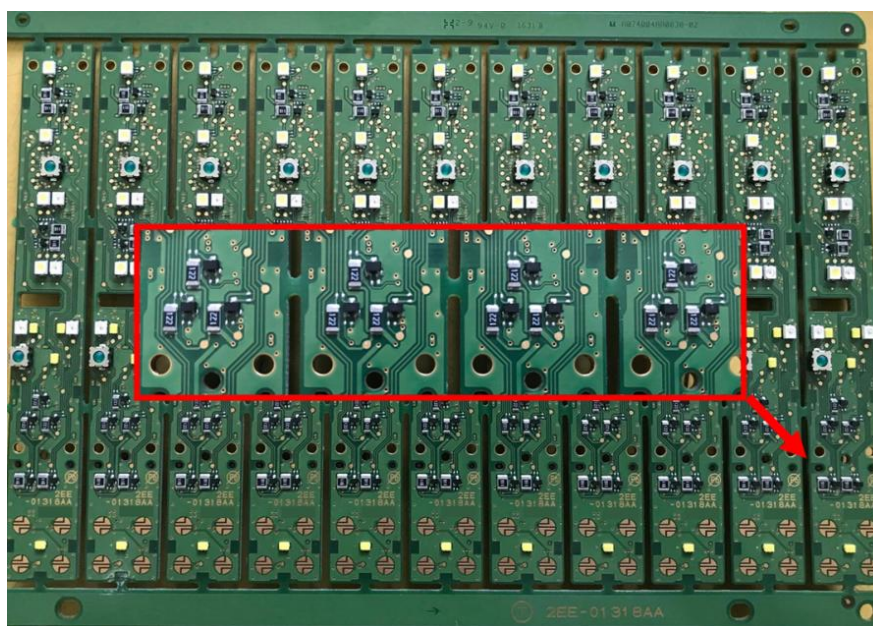


Obr. 7.9 Poloautomatizované měření pevnosti pájeného spoje SMT ve stříhu, SnPb, SMD 0603

Jak je z uvedených výsledků vidět, zařízení bez problémů změřilo pevnosti pájených spojů součástek velikosti pouzdra 0603, přičemž průměrná hodnota vyšla $F = 15,96 \text{ N}$ a měření vykázala směrodatnou odchylku $\sigma_F = 1,6 \text{ N}$. Na grafickém průběhu jednotlivých měření je zřejmá vyšší tažnost spojů. Měření součástek menších než velikosti 0805 (mikropalcová míra) je tedy na zařízení možné. U proměřeného vzorku je neznámá historie stárnutí spojů, což mohlo ovlivnit naměřené výsledky.

7.4.2 Vzorky DPS se součástkami SMD velikosti 1206 zapájené slitinou typu SAC

Vzorek určený pro měření pevnosti pájeného spoje součástek velikosti 1206 (mikropalcová míra) zapájených slitinou typu SAC s vyznačenou oblastí měření, viz obrázek 7.10.

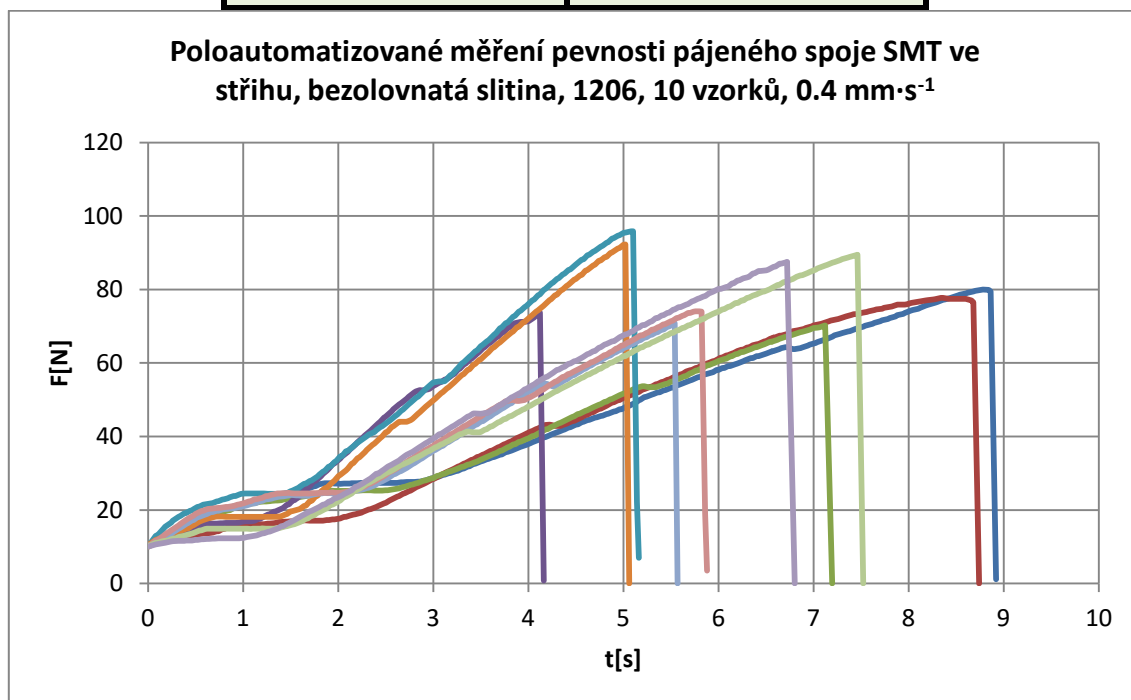


Obr. 7.10 Vzorek DPS se součástkami SMD velikosti 1206, zapájenými slitinou typu SAC

Bylo provedeno 10 měření, srovnání naměřených hodnot pevností pájeného spoje těchto měření je shrnuto v tabulce 7.5. Průběhy sil v čase jednotlivých měření poté shrnuje graf na obrázku 7.11.

Tab. 7.5 Měření pevnosti pájeného spoje DPS se součástkami SMD velikosti 1206, bezolovnatá slitina typu SAC

Slitina Typu SAC	PushPull V1.0
	F [N]
Výška hrotu od DPS: 0,1 mm	80,00
	77,50
	70,20
	73,70
	95,80
	92,30
	70,80
	89,50
	74,10
	87,50
<hr/>	
Průměr [N]:	81,14
σ_F [N]:	8,92



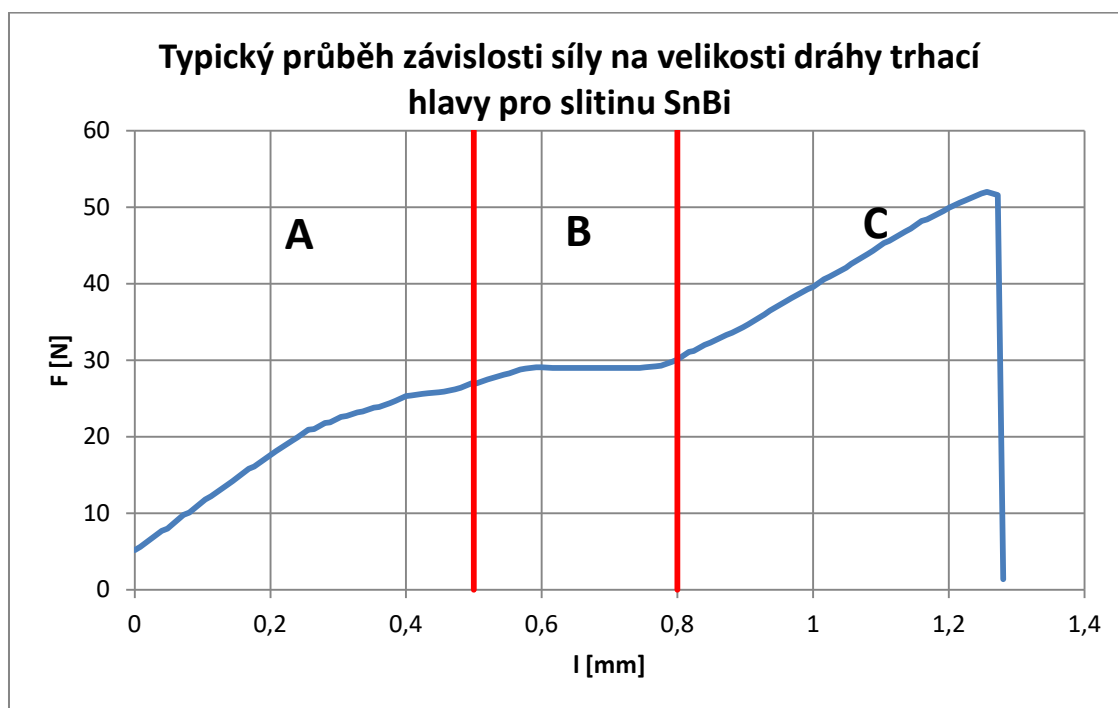
Obr. 7.11 Poloautomatizované měření pevnosti pájeného spoje SMT ve stříhu, bezolovnatá slitina, 1206

Zařízení změřilo pevnosti pájených spojů součástek velikosti pouzdra 0603, přičemž průměrná hodnota vyšla $F = 81,14 \text{ N}$ a měření vykázala směrodatnou odchylku $\sigma_F = 8,92 \text{ N}$. Z grafického průběhu lze vyhodnotit, že ačkoliv byly vzorky měřeny za stejných podmínek, nárůst síly byl různý. Příčinou nehomogenity dosažených výsledků může být profrézování drážek mezi jednotlivými deskami v multipanelu, což zvýšilo pružnost měřené DPS a tento jev se negativně projevil na průbězích měření.

Z tohoto měření vyplývá, že zařízení je vhodné k měření pevnosti pájeného spoje u součástek velikosti 1206 (mikropalcová míra). Dá se rovněž usuzovat, že je vhodné k měření i větších součástek, vyžadujících větší vyvíjecí sílu motoru.

7.5 Typické průběhy měření pájeného spoje pro slitiny SnBi a SAC305

Z grafických průběhů měření vzorků zapájených slitinami SnBi a SAC305 v kapitolách 7.1 a 7.2 lze odvodit jakýsi typický průběh tohoto grafu, který je pro obě slitiny různý. Tyto průběhy závislosti síly na čase byly převedeny na průběhy závislosti síly na velikosti dráhy l , kterou urazí trhací hlava, jelikož všechny vzorky byly měřeny při stejné rychlosti pohybu trhací hlavy $v = 0,4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Typický průběh pro slitinu SnBi popisuje graf na obrázku 7.12.



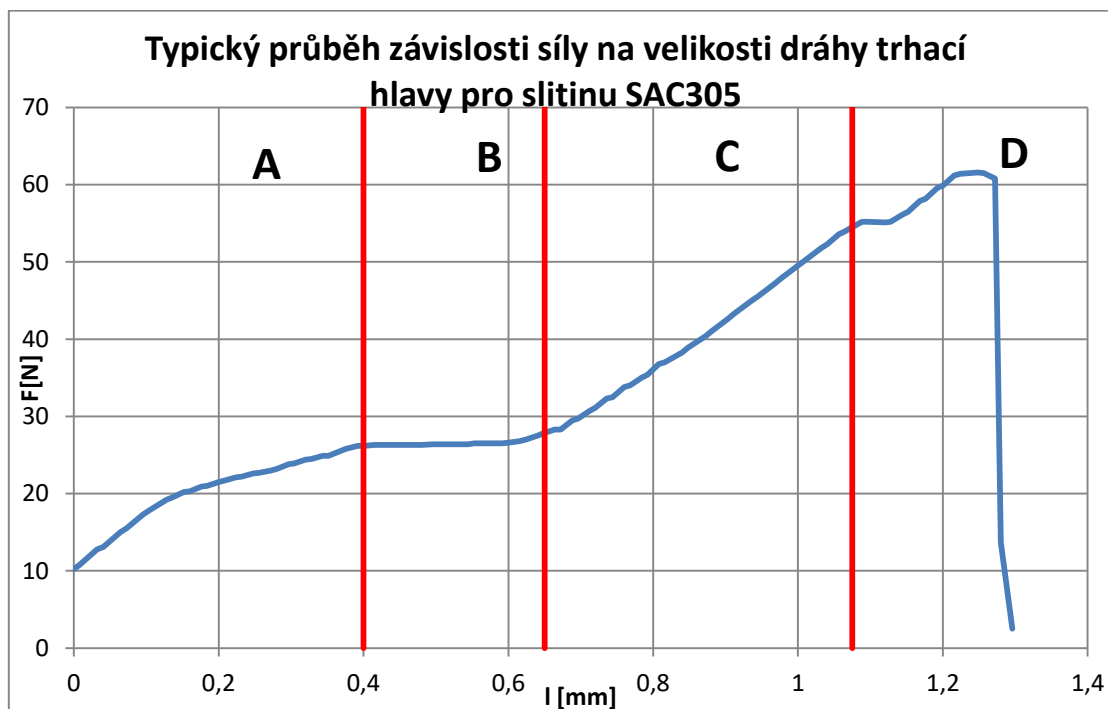
Obr. 7.12 Typický průběh závislosti síly na velikosti dráhy trhací hlavy pro slitinu SnBi

Tento graf lze rozdělit na 3 oblasti:

- **oblast A** – síla téměř lineárně narůstá do určité hodnoty síly – oblast elastické deformace a platnosti Hookova zákona, posléze se tento průběh začne pozvolna narovnávat,
- **oblast B** – oblast tečení pájeného spoje, spoj se plasticky deformuje, přičemž vyvíjená síla je v oblasti téměř konstantní,
- **oblast C** – po překonání oblasti tečení začne síla opět téměř lineárně narůstat, probíhá zde plastická deformace, síla postupně narůstá a ve vrcholovém bodu síly

reflektujícím pevnost daného pájeného spoje se spoj přetrhává.

Typický průběh pro slitinu SAC305 popisuje graf na obrázku 7.13.



Obr. 7.13 Typický průběh závislosti síly na velikosti dráhy trhací hlavy pro slitinu SAC305

Tento graf lze rozdělit na 4 oblasti:

- **oblast A** – síla téměř lineárně narůstá do určité hodnoty síly – oblast elastické deformace a platnosti Hookova zákona, posléze se tento průběh začne pozvolna narovnávat,
- **oblast B** – oblast tečení pájeného spoje, spoj se plasticky deformuje, přičemž vyvíjená síla je v oblasti téměř konstantní,
- **oblast C** – po překonání oblasti tečení začne síla opět téměř lineárně narůstat, probíhá zde plastická deformace, síla postupně narůstá,
- **oblast D** – dochází ke krátkodobému druhotnému tečení pájeného spoje způsobeným příměsí mědi ve slitině, síla poté opět lineárně vzroste a dochází k utržení součástky.

7.5.1 Návrh implementace zařízení do výuky předmětu MMOT

Vyrobené a otestované zařízení je možné plně využít v laboratorní výuce předmětu „Montážní a propojovací technologie“ (MMOT). Navrhuje se jeho implementace jako část jedné z laboratorních úloh.

Vzhledem k tomu, že programové vybavení měřicí soustavy umožňuje vykreslování změřených závislostí a jejich následné uložení, doporučuje se v rámci laboratorní úlohy změřit pevnost pájeného spoje 10 součástek zapájených pastou SnBi a 10 součástek zapájených pastou SAC305. Naměřená data si následně studenti uloží a v domácím vypracování zpracují srovnání změřených hodnot pevností podle použité slitiny, rovněž provedou grafické srovnání těchto vzorků a popíší průběh těchto grafů (viz kapitola 7.5).

Návrh zadání části laboratorní úlohy obsahující vytvořené pracoviště pro měření pájeného spoje je obsahem následující strany.

Měření pevnosti pájeného spoje

Upozornění!

Seznamte se s návodem pro ovládání řídicí jednotky posuvu trhacího zařízení PushPull V1.0 a s návodem pro ovládání siloměrného čidla MARK-10 včetně programového vybavení MESURgauge přítomným na pracovišti. **Za veškerá případná zranění či poškození zařízení vlivem nesprávné manipulace nese odpovědnost obsluhující pracovník!**

Měřicí postup:

1. Zapněte program **MESURgauge**, v horní liště programu přepněte na záložku **Test Setup**, zde nastavte následující hodnoty:

Start Condition	Stop condition	Test Units	Reading Mode	Load Stop Condition
Load: 5	Load: 5	Newtons (N)	Continuous readings: 50	Falling edge 2

2. Poté ve stejné záložce klikněte u položky Test Units na tlačítko **SET**. Tímto jste nastavili měřicí podmínky.
3. **Sesouhlaste zkoumanou součástku na DPS v upínacím držáku s trhací hlavou** zařízení tak, aby vzdálenost nože od substrátu DPS byla **0,1 mm**. Tuto hodnotu změříte pomocí mikroskopu připevněném na trhacím zařízení a programu k jeho obsluze **MicroCapture**.
4. Na zařízení **PushPull V1.0** nastavte rychlost posuvu $0,4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Přepínač směru pohybu musí být v poloze **Retract ▼**. Následně v programu **MESURgauge** v záložce **Acquisition** klikněte na **ZERO GAUGE** a poté klikněte na **START**. Poté na zařízení **PushPull V1.0** přepněte spínač do polohy **RUN**, po utrnutí součástky přepněte přepínač do polohy **STOP**, přepněte směr pohybu na **Protrude ▲** a přepnutím přepínače opět do polohy **RUN** povyďte s trhací hlavou zpět nad úroveň měřených součástek.
5. V programu **MESURgauge** v záložce **Analysis**, klikněte na **Export to Excel** a **měření si uložte**.
6. Uvolněte upínák na DPS a opakujte kroky 3-5.

Úkoly:

1. Změřte hodnoty pevností pájených spojů u 10 součástek ze vzorku zapájeného slitinou SnBi a 10 součástek ze vzorku zapájeného slitinou SAC305.
2. Ze získaných hodnot pevností pájených spojů určete pro každý typ pájecí slitiny průměrnou hodnotu. **Tyto hodnoty spolu porovnejte.**
3. Vybraný průběh měření u slitiny SnBi vynesete s vybraným průběhem měření u slitiny SAC305 do jednoho grafu. **Porovnejte a slovně zdůvodněte tvary grafů, případně jejich rozdíly.**

8 EVALUACE ZAŘÍZENÍ

Realizace celého zařízení měla za účel vytvořit pracoviště použitelné nejen v laboratorní výuce, nýbrž i k případnému měření budoucích závěrečných prací. Již předchozí manuální pracoviště a jeho úpravy byly předmětem závěrečné práce, v rámci které byl vytvořen upínák na zkoumané DPS a úchyt trhací hlavy. Díly byly vytvořeny na míru použité mechaniky a bylo rozhodnuto je zachovat, proto bylo cílem vytvořit, pokud možno co nejméně nákladnou cestou, úpravy stávající mechaniky a implementace motorizovaného řízeného posuvu. Jedním z aspektů zhodnocení zařízení bude tedy cena realizovaných vylepšení.

V zařízení je použito siloměrné čidlo od firmy MARK-10. Firma má v nabídce k tomuto čidlu motorizovaný posuv. Dalším aspektem zhodnocení realizace tohoto zařízení je rovněž srovnání se zařízením profesionálním jak z hlediska technického, tak finančního.

8.1 Zhodnocení nákladů

Tabulka 8.1 shrnuje reálné náklady provedených úprav na zařízení. Tyto náklady nezahrnují materiál určený k vývoji zařízení a přebytečný materiál přítomný kvůli stanoveným minimálnímu počtu objednávaných kusů u určitých artiklů distributorem (DPS, spojovací materiál aj.).

Tabulka rovněž porovnává reálné náklady všech úprav s odhadem na náklady vypracovaným v rámci semestrální práce.

Tab. 8.1 Zhodnocení nákladů provedených vylepšení na zařízení

Artikl	Množství	Mn. Jednotka	Cena [Kč]	Odhadovaná cena [Kč]	Odchylka od odhadu ceny [Kč]
Lineární aktuátor 12 V/ 200 mm/ 4 mm·s ⁻¹ /1500 N	1	Ks	0	850	-850
Neosazená DPS (1,4 dm ² /zelená NP/HAL/2-vrtvá)	1	Ks	168	200	-32
Elektronika řídicího modulu posuvu			412	400	+12
Veškerá kabeláž zařízení			128	0	+128
Transformátor 230VAC/15VD5A	1	Ks	313	200	+113
Přístrojová krabice ABS (150×70×179) mm	1	Ks	120	0	+120
Vodící tyč posuvu (včetně soustružnických prací)	1	Ks	830	175	+655
Světlák lineárního vedení (včetně soustružnických prací)	1	Ks	700	0	+700
Lineární ložiska LM25 (25×40×59) mm	2	Ks	80	40	+40
Duralový profil – tvar C (12×22) mm, drážka 12mm, stěna 2 mm	400	mm	25	25	0

Duralový profil – tvar hranol (10×20) mm	400	mm	40	40	0
Kameny T do profilu C	4	Ks	68	80	-12
Polep předního panelu zařízení	1	Ks	30	0	+30
Křídlové šrouby M10X30	4	Ks	104	40	+64
Veškerý spojovací materiál			97	100	-3
Distanční sloupky M6X40	4	Ks	112	0	+112
Náklady na dopravu			218	335	-117
SUMA:			3445	2485	+960

Ze shrnutí lze usoudit, že výsledná vylepšení byla o 960 Kč dražší než odhadované náklady před začátkem realizace. Lineární aktuátor použitý v zařízení byl nakonec díky pozdnímu dodání plně hrazen distributorem, což snížilo náklady na jeho pořízení na 0 Kč. Úpravy nejvýrazněji oproti odhadu zdražily soustružené díly lineárního vedení, neboť původně bylo zvažováno nepoužití soustruženého svěráku lineárního vedení. Navzdory odchýlení od odhadu výsledné ceny nákladů je celková cena 3445 Kč vyhodnocena jako uspokojivá.

8.2 Porovnání s profesionálním posuvem firmy MARK-10

Výrobce použitého siloměru, firma MARK-10 má ve své nabídce motorizovaný posuvy různých specifikací. Nejlevnějším z těchto posuvů je ESM303, viz obrázek 8.1.



Obr. 8.1 Základní motorizovaný posuv firmy MARK-10, model ESM303, převzato z [27]

Na tento posuv se připevní siloměrné čidlo a tvoří pak plnohodnotný motorizovaný trhací přístroj. Porovnání posuvu ESM303 s navrženým a vyrobeným posuvem PushPull V1.0 z technického i finančního pohledu je shrnuto v tabulce 8.2.

Tab. 8.2 Srovnání specifik vyrobeného posuvu PushPull V1.0 se specifiky profesionálního posuvu ESM303 [27]

	ESM303	PushPull V1.0
Způsob nastavení rychlosti:	Digitální	Analogový
Maximální vyvíjecí síla	1500 N	1500 N
Minimální rychlost	*0,5 (13) mm·s⁻¹	0,4 mm·s⁻¹
Maximální rychlost	330 mm·s⁻¹	4 mm·s⁻¹
Cena:	**66549 Kč	3345 Kč

Zeleně vyznačené specifiky v tabulce jsou vyhodnoceny jako lepší, červeně vyznačené specifiky jako horší. Zařízení PushPull V1.0 disponuje analogovým nastavením rychlosti posuvu trhačí hlavy, což může vést k nepřesnému nastavení hodnoty, zatímco posuv ESM303 disponuje plně digitálním nastavením rychlosti. Maximální vyvíjecí síla je u obou přístrojů shodná, 1500 N.

Při porovnávání minimálních dosažitelných rychlostí, je potřeba vzít v úvahu fakt, že posuv ESM303 má danou spodní mez rychlosti posuvu (0,5 mm·s⁻¹) vedenou jako příplatkovou (*). Standardní spodní hranice jeho rychlosti je 13 mm·s⁻¹. Naproti tomu posuv PushPull V1.0 disponuje spodní hranicí rychlosti ještě menší (0,4 mm·s⁻¹). Pokud však jde o porovnání nejvyšší možné nastavitelné rychlosti, disponuje posuv ESM303 horní hranicí 330 mm·s⁻¹ oproti horní hranici zařízení PushPull V1.0 4 mm·s⁻¹. Pro využití k měření pevnosti pájeného spoje je však maximální rychlost 4 mm·s⁻¹ dostačující.

Posledním srovnávacím faktorem je cena obou zařízení. V přímém srovnání je zařízení PushPull V1.0 téměř 20x levnější. Cena uvedená v tabulce u zařízení ESM303 je však přepočítaná základní cena (**nereflektující úpravu spodní hranice rychlosti) bez daně a nákladů za dovoz a instalaci.

9 ZÁVĚR

V diplomové práci byla provedena rešerše na téma fyzikální vlastnosti pevnosti pevných látek, teorie pevnosti pájeného spoje a spojení tohoto tématu s tématem měřením pevnosti pájeného spoje ve střihu a v tahu. Byly rozebrány možnosti měření pájeného spoje v souvislosti s normami popisující takovéto měření.

Měřením byl ověřen a rozebrán problém opakovatelnosti měření pevnosti pájeného spoje na zařízení v laboratoři na UETE FEKT VUT. Tento problém je způsoben nevhodnou mechanikou posuvu měřicího trhacího přístroje a jeho manuálním ovládáním. Inovace zařízení byly žádoucí provést s důrazem na co možná největší zachování mechaniky manuálního zařízení, kvůli příslušenství zařízení konstruovanému právě pro tuto mechaniku v rámci jiné závěrečné práce. Bylo proto navrženo řešení spočívající v nahrazení manuálního posuvu posuvem motorizovaným, schopným vyvinout dostatečnou sílu v požadovaném rozsahu rychlosti. Rovněž byla navržena inovace mechaniky posuvu použitím lineárních ložisek a hlazené ocelové tyče.

Držák na DPS pro měření pevnosti pájeného spoje v tahu byl vyhodnocen jako uživatelsky nepřívětivý a nevhodný pro širší sérii měření. Následně byl v programovém prostředí SolidWorks proveden kompletní návrh sestavy nového držáku, jenž je snadno konstruovatelný, kompatibilní se zachovávanou mechanikou přístroje, jednoduše nastavitelný a méně náročný na parametry testované DPS. Rovněž byl navržen možný nový systém řešení upínání zkoumaného vývodu do trhací hlavy.

Mechanika manuálního posuvu byla vylepšena, vodící ozubená osa byla nahrazena vysoustruženou hlazenou osou, jenž má v sobě drážku, do které byl usazen svěrák lineárního vedení, proti zabránění házení v osách X a Y. V posuvném dílu zařízení jsou upevněny dvě lineární ložiska, které tak zajišťují naprosto hladký posuv. Mezi horní a spodní díl posuvu byl upevněn lineární aktuátor o maximální vyvíjecí síle $F = 1500 \text{ N}$. Rovněž byl zkonstruován držák na DPS pro měření pevnosti pájeného spoje v tahu.

Dle požadovaných specifik budoucího zařízení, bylo v návrhovém prostředí Altium Designer vytvořen elektrický návrh DPS řídicího modulu zařízení. DPS byla osazena a celý řídicí modul vsazen do přístrojové krabice s ovládáním na předním panelu. Následně byla provedena a zdokumentována kalibrace nastavení rychlosti zařízení, kdy efektivní rozsah pro měření byl nastaven na $0,4 - 4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Dále bylo také nakalibrováno bezpečnostní proudové omezení aktuátoru, kdy se při pohybu dolů zařízení vypne při hodnotě vyvíjené síly $F_d = 499,5 \text{ N}$ a při pohybu nahoru je vypínací hodnota nastavena na $F_n = 472,5 \text{ N}$. Toto omezení zaručuje ochranu digitálního siloměru proti stržení.

Možnost nastavení konstantní rychlosti vyřešila problémy s opakovatelností měření manuálního zařízení. Byly proto provedeny testovací měření, kdy byly naměřené hodnoty porovnány nejdříve s výsledky dosaženými na profesionálním zařízení pro měření pevnosti pájeného spoje DAGE PC2400. U tohoto srovnání byla u jedné sady vzorků zjištěna hodnota odchýlení od střední hodnoty $14,5 \%$ a u druhé sady vzorků $1,7 \%$, což jsou velmi uspokojivé výsledky. Dále bylo provedeno srovnání s dříve naměřenými výsledky manuálního měření, kdy grafické průběhy jeví lepší překryv a dokazovaly tedy konstantní podmínky měření. Následně bylo provedeno experimentální měření pevnosti pájených spojů u různých velikostí pouzder zapájenými rozdílnými pájecími slitinami. Rovněž byly u slitin SnBi a SAC305 definovány typické průběhy těchto měření.

Byly provedeny finální kalkulace nákladů všech vylepšení, kdy výsledná cena zařízení dosáhla 3345 Kč , což je sice o 960 Kč více, než byl prvotní odhad, i přesto je však

specifikami téměř srovnatelný jako profesionální motorizovaný posuv EM303, jenž v základní verzi stojí téměř 20x více. Výsledná cena je tedy uspokojující. Jako nejvýznamnější nevýhoda vyrobeného posuvu se jeví analogové nastavení rychlosti, naopak nejvyšší předností je malá spodní hranice nastavitelné rychlosti, kdy zařízení dosahuje nižší hodnoty než příplatková verze posuvu ESM303.

Byla navržena implementace inovovaného zařízení a vzniklého pracoviště do výuky předmětu „Montážní a propojovací technologie“ (MMOT) na FEKT VUT v podobě části laboratorní úlohy, jejíž zadání je součástí práce.

Potenciál tohoto zařízení tkví ve využití tohoto zařízení nejen ve výuce, nýbrž i při měření v rámci závěrečných prací a při dalších technických aplikacích vyžadujících měření pevnosti materiálů aj. Jako další přínos se jeví prozkoumání typických průběhů měření u více pájecích slitin (např. SnPb aj.).

Dalším posunem by bylo inovování řídicí jednotky o digitální nastavení rychlosti, což by ještě zvýšilo kvalitu získaných výsledků. Rovněž velmi přínosné by zavedení způsobu přesnějšího definování vzdálenosti DPS od trhačního hrotu. Vhodné by bylo také prozkoumat možnost testování pevnosti „natupo“ pájených spojů a vývodů kontaktovaných. Větší pozornost v následných pracích by bylo vhodné věnovat i hlubší analýze grafických průběhů naměřených křivek.

LITERATURA

- [1] JANSÁ, V. *Pevnost pájených spojů na keramických substrátech* [online]. Brno, 2013 [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=69279. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Martin Adámek Ph.D.
- [2] STARÝ, J. a P. KAHLE. *Plošné spoje a povrchová montáž* [online]. Brno, 2003 [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=21618. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně.
- [3] KLAUZ, M. Pět hlavních příčin selhání pájeného spoje. *DPS: Elektronika od A po Z*. 2018, **9. ročník** (6), 40 s. ISSN 1805-5044.
- [4] STARÝ, J. a M. ZATLOUKAL. *Montážní a propojovací technologie* [online]. Brno, 2015 [cit. 2018-12-03]. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně.
- [5] *Explanation of Stress Strain Curve* [online]. Civil Engineering Smart Study Zone, 2017 [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <https://cesmartstudyzone.blogspot.com/2017/09/explanation-of-stress-strain-curve.html>
- [6] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER, DUB, Petr, ed. *Fyzika*. 2., přeprac. vyd. Brno: VUTIUM, c2013. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-8-021-44123-1.
- [7] LILKOVA-MARKOVA, S., A. MLADENSKI a D. KINDOVA-PETROVA. *Selected topics on strength of materials* [online]. Sofia, Bulharsko, 2014 [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: https://uacg.bg/filebank/att_6146.pdf. UACG.
- [8] HUNT, Ch., M WICKHAM a J. NOTTAY. *A Review of Mechanical Test Method Standards for Lead-Free solders* [online]. Teddington, Middlesex, UK, 2001 [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Christopher_Hunt5/publication/264871321_A_Review_of_Mechanical_Test_Method_Standards_for_Lead-Free_Solders/links/542bf23f0cf27e39fa91c1fd/A-Review-of-Mechanical-Test-Method-Standards-for-Lead-Free-Solders.pdf. National physical laboratory.
- [9] SAWAMURA, T. a T. IGARASHI. *Difference between various Sn/Ag/Cu solder compositions* [online]. 2005 [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <http://www.almit.com/dloads/Agents/SAC%20Alloy%20Comparison.pdf>. Almit Ltd.
- [10] *Reflow soldering profiles* [online]. 2018 [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <https://www.compuphase.com/electronics/reflowsolderprofiles.htm>. CompuPhase.
- [11] JEITA ET-7409: Surface mount technology - environmental and endurance test methods for solder joints of surface mount device Part 103: Torque shear strength test [online]. Tokyo, JP, 2008 [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: https://www.jeita.or.jp/english/standard/pdf/ET-7409-103_e.pdf. Japan Electronics and Information Technology Industries Association.
- [12] *PCB Pull & Shear Test* [online]. West Sussex, UK [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <https://www.mecmesin.com/stories/CS29%20PCB%20Shear%20and%20Pull%20Test.pdf>. Mecmesin Limited.
- [13] IEC 62137-1-2:2007: Surface mounting technology - Environmental and endurance test methods for surface mount solder joint - Part 1-2: Shear strength test [online]. 1. vydání, 2007 [cit. 2018-12-03].
- [14] IEC 62137-1-1:2007: Surface mounting technology - Environmental and endurance test methods for surface mount solder joint - Part 1-1: Pull strength test [online]. 1. vydání, 2007 [cit. 2018-12-03].
- [15] *DAGE bondtester 4000 Optima Microelectronic bondtest equipment* [online]. [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <http://www.ab-electronic.com/en/p566/productos-dage-bondtester-4000-optima->

equipo-bondtest-para-microelectronica. AB-electronic.com

- [16] KONEČNÝ, A. *Měření pevnosti pájeného spoje* [online]. Brno, 2018 [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=175902. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jiří Starý Ph.D.
- [17] *Stojan na vrtačku EXCLUSIVE 5027000* [online]. [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: http://www.stabila.cz/wolfcraft-5027000-stojan-na-vrtacku-pro-pr-43mm-upinaci-plocha-203x307mm_d74598.html. Stabila.
- [18] Linear Actuators. *Idc-Online* [online]. [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/mechanical_engineering/Linear_Actuators.pdf
- [19] Linear Actuators. *Design Engineering* [online]. 10. 2. 2016 [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <https://www.design-engineering.com/products/linear-actuators-4/>
- [20] Electric Linear Actuator 12V/24V DC Motor. *AliExpress* [online]. [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/Electric-Linear-Actuator-12V-24V-DC-Motor-200mm-Stroke-Linear-Motion-Controller-500N-1000N-1300N-Max/32809655815.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.3da24c4dMGwDuv>
- [21] What is a Pulse Width Modulation (PWM) Signal and What is it Used For?. *National Instruments - Knowledge* [online]. [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z0000019OkFSAU>
- [22] Sallen Key Low Pass Filter Design Tool. *Sim.okawa-denshi.jp* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://sim.okawa-denshi.jp/en/OPseikiLowkeisan.htm>
- [23] Sallen Key. *Sciencedirect.com* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/sallen-key>
- [24] Sallen-Key Low Pass Filter Design Equations. *Daycounter.com* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.daycounter.com/Filters/SallenKeyLP/Sallen-Key-LP-Filter-Design-Equations.phtml>
- [25] *The Fundamentals of Solder Joint of Solder Joint Design – Part 1 – Through Hole Technology (THT)* [online]. [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: http://www.eptac.com/webinars/presentations/eptac_05_22_13.pdf
- [26] JANSÁ, V. Bc. *Teplotní stárnutí bezolovnatých nízkoteplotních spojů* [online]. Brno, 2018 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=172777. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Martin Adámek Ph.D.
- [27] *ESM303 Motorized Tension/Compression Test Stand*. Datasheet. [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.mark-10.com/pdf/DataSheetESM303.pdf>. MARK-10

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

δ	Mechanické napětí
ε	Relativní délkové prodloužení
E	Modul pružnosti v tahu
Δ_l	Změna sledované délky
l_0	Počáteční hodnota sledované délky
F	Síla
S	Plocha
t	Čas
R	Elektrický odpor
C	Kapacita
f	Frekvence
Q	Kvalitativní faktor
l	Dráha, vzdálenost
DPS	Deska Plošných Spojů
SMD	Surface Mounted Device, Součástka povrchové montáže
SMT	Surface Mount Technology, Technologie povrchové montáže
THT	Through-hole Technology, Technologie osazení s vývodu jdoucími skrz desku
PWM	Pulse Width Modulation, Pulzně šířková modulace
CSV	Comma-Separated Values, jednoduchý tabulkový formát
NP	Nepájivá maska
HAL	Hot-Air Leveling – typ povrchové úpravy
ENIG	Electroless Nickel Immersion Gold – typ povrchové úpravy

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1	Grafická závislost prodloužení na mechanickém namáhání, převzato z [5].....	9
Obr. 1.2	Grafické naznačení typů testů pevností (zleva doprava pull, push, shear), převzato z [8].....	10
Obr. 1.3	Porovnání pájecích slitin v tahu (okolní teplota = 20 °C, rychlost tažení = 10 mm/min), převzato z [9]	11
Obr. 1.4	Naznačení vrstev pájeného spoje a oblasti vyhodnocení pevnostních zkoušek, převzato z [11]	13
Obr. 1.5	Správné nastavení stříhové hlavy vůči testované součástce	13
Obr. 1.6	Možný průběh tahové zkoušky na vývodu THT součástky (varianta s vytržením pokoveného otvoru).....	14
Obr. 1.7	Možný průběh tahové zkoušky na vývodu zapájeném natupo SMT součástky (varianta s přetržením v pájecí slitině).....	15
Obr. 1.8	Multifunkční bondtester Nordson DAGE 4000, převzato z [15].....	16
Obr. 2.1	Laboratorní měřicí soustava pro měření pevnosti pájeného spoje.....	16
Obr. 2.2	Siloměr MARK-10 M5-100	17
Obr. 2.3	Stojan na vrtačku Wolfcraft 5027000, převzato z [17].....	18
Obr. 2.4	Držák pro pevnostní zkoušky stříhem	19
Obr. 2.5	Fixace DPS pro pevnostní zkoušky tahem	19
Obr. 3.1	Testovací desky pro měření pevnosti pájeného spoje ve stříhu.....	20
Obr. 3.2	Zapájené testovací vzorky pro měření pevnosti pájeného spoje v tahu (1 pokovený otvor).....	22
Obr. 3.3	Háková hlava měřidla, vzorky tvaru písmene U před a po měření.....	22
Obr. 3.4	Natvarování trubičkové pájky, zapájené testovací vývody natupo na ploškách.....	23
Obr. 3.5	Pohled na vývod a plošky zapájené slitinou SnBi natupo po měření pevnosti pájeného spoje v tahu	23
Obr. 4.1	Porovnání průběhů manuálních měření pevnosti pájeného spoje ve stříhu u 9 vzorků SMT součástek velikosti 1206, připájených pájecí pastou SAC305	24
Obr. 4.2	Utahovací svěrákový hrot přiložení k zařízení MARK-10 M5-100	25
Obr. 5.1	Vývojový diagram inovovaného zařízení při měření	26
Obr. 5.2	Ilustrační řez lineárním aktuátorem a pohled na vnitřní součásti, převzato z [19]	27
Obr. 5.3	Uvažované umístění lineárního aktuátoru do mechaniky posuvu, originální obrázek převzat z [16]	28
Obr. 5.4	Mechanika posuvu, červeně označena tyč s ozubením, zeleně posuvný díl stojanu, originální obrázek převzat z [16]	28
Obr. 5.5	Rozměry zvoleného válcového lineárního kuličkového ložiska.....	29
Obr. 5.6	Návrh konstrukce držáku na DPS pro měření pevnosti pájeného spoje v tahu	29
Obr. 5.7	Ilustrační model návrhu úpravy hlavy na měření pájeného spoje v tahu.....	30
Obr. 6.1	Blokové schéma řídicí jednotky PushPull V1.0	30

Obr. 6.2	Schéma zapojení elektroniky přístroje PushPull V1.0.....	31
Obr. 6.3	Základní zapojení filtru typu Sallen-Key, převzato z [22]	32
Obr. 6.4	Horní (červená) a dolní (modrá) vrstva DPS řídicí jednotky PushPull V1.0	33
Obr. 6.5	Osazená DPS řídicího modulu zařízení PushPull V1.0	33
Obr. 6.6	Elektrická ochrana zařízení ve schématu (vlevo) a na DPS (vpravo).....	34
Obr. 6.7	Vnitřní kabeláž přístrojové krabice s vyznačeným zemnicím bodem	34
Obr. 6.8	Bezpečnostní pečeť na přístrojové krabice	34
Obr. 6.9	Přední panel (horní část) a zadní panel (spodní část) zařízení PushPull V1.0.....	35
Obr. 6.10	Lineární ložiska upnuté do části těla původní mechaniky	38
Obr. 6.11	Svěrák lineárního vedení na těle posuvné části přístroje	39
Obr. 6.12	Vyztužený trhací hlavy proti případnému ohybu do stran.....	39
Obr. 6.13	Konečná podoba pracoviště na měření pevnosti pájeného spoje.....	40
Obr. 6.14	Zkonstruovaný držák na DPS pro měření pájeného spoje v tahu	40
Obr. 6.15	Hákový středový kus pro měření pájeného spoje v tahu.	41
Obr. 7.1	Pracoviště s microbondtesterem DAGE PC2400	42
Obr. 7.2	Vzorky DPS se součástkami SMT 0805 zapájenými slitinou SnBi	42
Obr. 7.3	Vzorky DPS se součástkami SMT 0805 zapájenými slitinou SAC305.....	44
Obr. 7.4	Poloautomatizované měření pevnosti pájeného spoje SMT ve střihu, SnBi, SMD 0805	46
Obr. 7.5	Srovnání vybraného měření manuálního posuvu s měřením motorizovaným posuvem, SnBi, velikost součástek 0805	47
Obr. 7.6	Poloautomatizované měření pevnosti pájeného spoje SMT ve střihu, SAC305, SMD 0805	47
Obr. 7.7	Srovnání vybraného měření manuálního posuvu s měřením motorizovaným posuvem, SAC305, SMD 0805.....	48
Obr. 7.8	Vzorek DPS se součástkami SMT 0603 zapájenými slitinou SnPb	49
Obr. 7.9	Poloautomatizované měření pevnosti pájeného spoje SMT ve střihu, SnPb, SMD 0603	50
Obr. 7.10	Vzorek DPS se součástkami SMD velikosti 1206, zapájenými slitinou typu SAC....	50
Obr. 7.11	Poloautomatizované měření pevnosti pájeného spoje SMT ve střihu, bezolovnatá slitina, 1206.....	51
Obr. 7.12	Typický průběh závislosti síly na velikosti dráhy trhací hlavy pro slitinu SnBi	52
Obr. 7.13	Typický průběh závislosti síly na velikosti dráhy trhací hlavy pro slitinu SAC305 ..	53
Obr. 8.1	Základní motorizovaný posuv firmy MARK-10, model ESM303, převzato z [27]...	56

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1	Srovnání pájených spojů ve střihu SMT součástek 0805 slitin SnBi a SAC305 .	20
Tab. 3.2	Průměry vývodů a rozměry pokovených otvorů a plošek použitých při měření pevnosti pájeného spoje v tahu.....	21
Tab. 3.3	Naměřené pevnosti pájených spojů, slitina SnBi, vývody zapájené natupo na ploškách.....	23
Tab. 5.1	Parametry zvoleného lineárního aktuátoru [19]	27
Tab. 6.1	Hodnoty pasivních součástek pro filtr druhého řádu typu Sallen-Key	32
Tab. 6.2	Měření linearitu vzestupu odporu na potenciometru nastavujícího rychlost	36
Tab. 6.3	Výsledky finálního nastavení rychlosti pomocí proměnného rezistoru R7.....	37
Tab. 6.4	Nastavené hodnoty maximálních rozsahů pomocí proudového omezení aktuátoru	38
Tab. 7.1	Srovnání výsledků měření pevnosti pájeného spoje u součástek 0805 SnBi s DAGE PC2400	43
Tab. 7.2	Srovnání výsledků měření pevnosti pájeného spoje u součástek SMD 0805 SAC305 s DAGE PC2400.....	45
Tab. 7.3	Srovnání měření poloautomatizovaným zařízením s měřením manuálním zařízením	46
Tab. 7.4	Měření pevnosti pájeného spoje DPS se součástkami SMT 0603, SnPb.....	49
Tab. 7.5	Měření pevnosti pájeného spoje DPS se součástkami SMD velikosti 1206, bezolovnatá slitina typu SAC	51
Tab. 8.1	Zhodnocení nákladů provedených vylepšení na zařízení.....	55
Tab. 8.2	Srovnání specifik vyrobeného posuvu PushPull V1.0 se specifiky profesionálního posuvu ESM303 [27].....	57

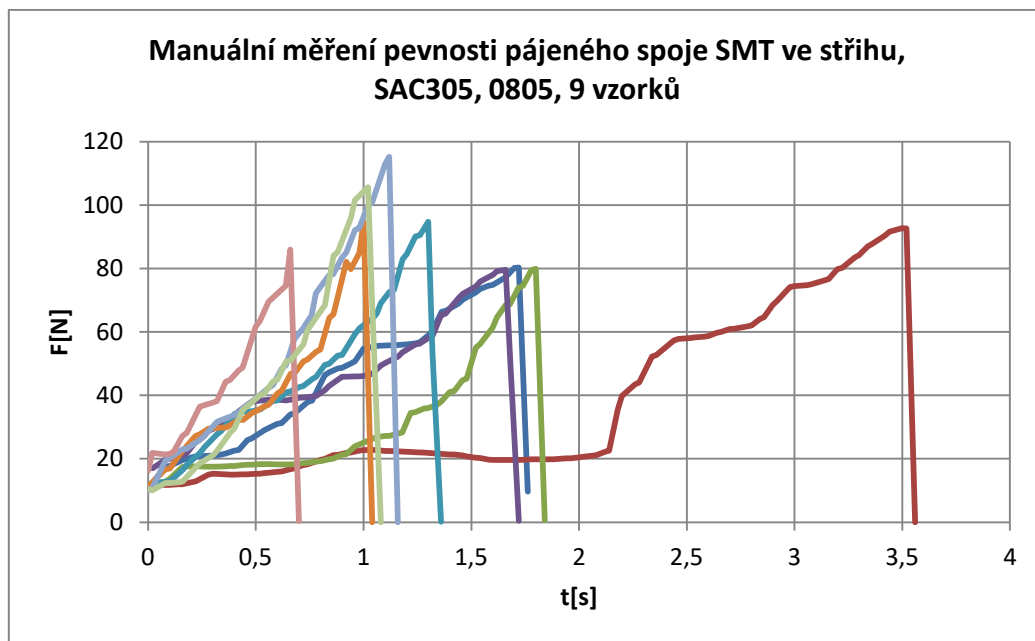
SEZNAM ROVNIC

(1.1)	Hookův zákon.....	9
(1.2)	Vztah pro výpočet relativního délkového prodloužení.....	9
(1.3)	Vztah pro výpočet mechanického napětí.....	10
(6.1)	Vztah pro výpočet mezní frekvence filtru typu Sallen-Key.....	33
(6.2)	Vztah pro výpočet kvalitativního faktoru filtru typu Sallen-Key.....	33

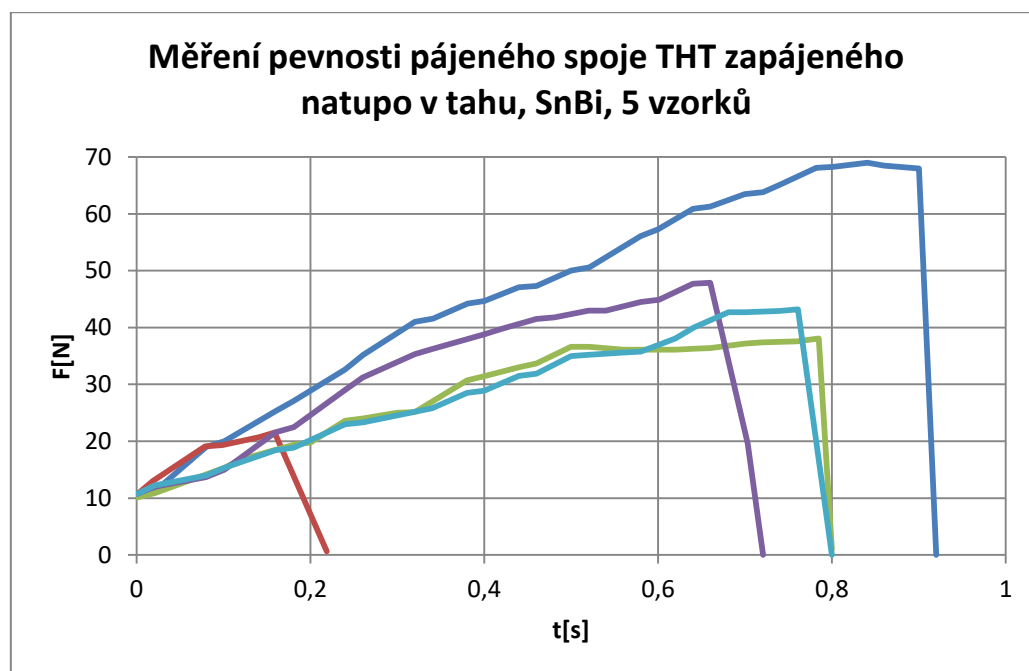
PŘÍLOHY

A GRAFY A ELEKTROTECHNICKÉ VÝKRESY

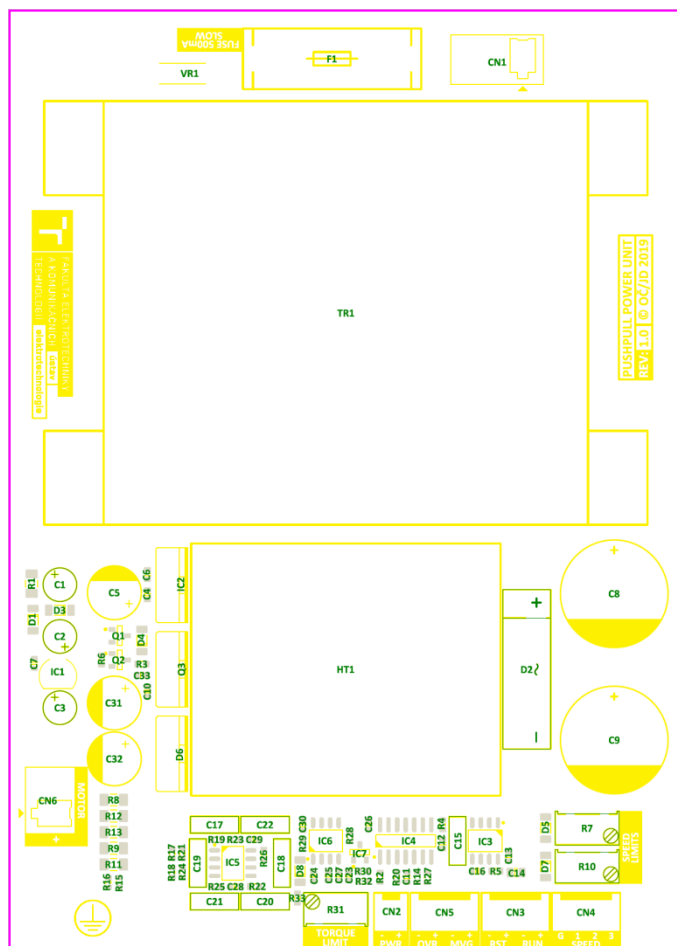
A.1 Manuální měření pevnosti pájeného spoje ve stříhu



A.2 Měření pevnosti pájeného spoje v tahu



A.3 Osazovací výkres a rozpiska součástek DPS zařízení PushPull V1.0

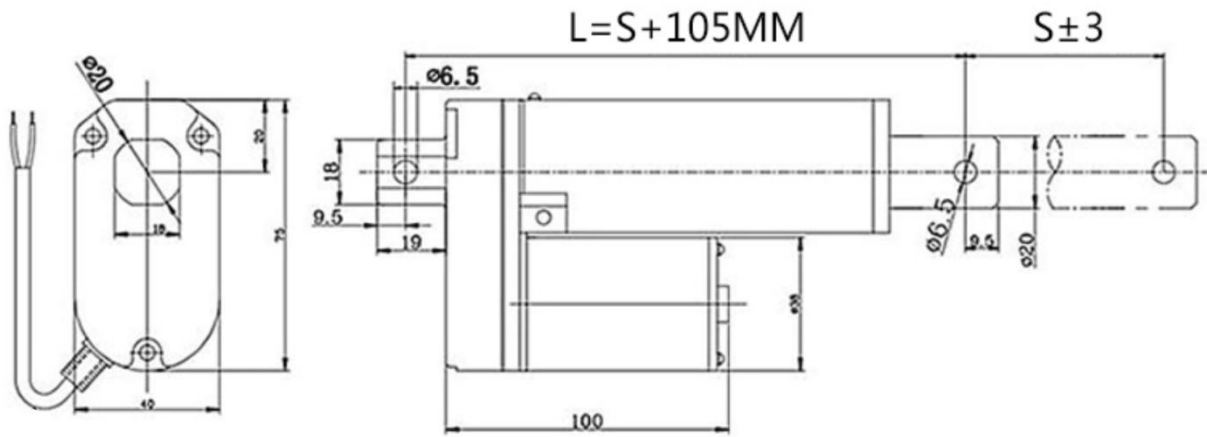


Quantity	Comment	Designator	Footprint
16	100n	C4, C6, C7, C10, C11, C12, C13, C16, C23, C25, C26, C27, C28, C29, C30, C33	CAPC1608X90N
12	1k	R2, R5, R6, R15, R16, R17, R18, R20, R21, R24, R26, R27	RESC1608N_ZERO
6	LL4148	D1, D3, D4, D5, D7, D8	SOD80, LL-34
5	0R5	R8, R9, R11, R12, R13	RESC3216X70N
3	100/25	C1, C2, C3	CAPPR200-500X1100
3	25k	R7, R10, R31	TRIM_BOURNS_3296Y
3	2k5	R19, R25, R28	RESC1608N_ZERO
3	9k1	R4, R14, R23	RESC1608N_ZERO
3	HEADER-1X4	CN3, CN4, CN5	HEADER-1X4
2	10n PES	C17, C21	CAPR500-250X720X650
2	220/25	C31, C32	WCAP-ATLI 8x11.5x3.5x0.5
2	22n PES	C20, C22	CAPR500-250X720X650
2	4700/25	C8, C9	WCAP-ATG8 16x25x7.5x0.8
2	4k7	R22, R29	RESC1608N_ZERO
1	0R	R30	RESC1608N_ZERO
1	100n PES	C18	CAPR500-250X720X650
1	10u/16V	C14	CAPC2012X135N
1	1n PES	C19	CAPR500-250X720X650
1	27R	R3	RESC1608N_ZERO
1	2P_TERM_BLOCK_HEADER	CN6	2P_PCB_TERM_BLOCK_HDR
1	3P_TERM_BLOCK_HEADER	CN1	3P_PCB_TERM_BLOCK_HDR
1	4011	IC4	SOIC127P600X175-14AN
1	470/16	C5	WCAP-ATLI 8x11.5x3.5x0.5
1	47k	R33	RESC1608N_ZERO
1	47R	R1	RESC3216X70N
1	4n7 PES	C15	CAPR500-250X720X650
1	BC807	Q1	SOT23-3
1	BC817	Q2	SOT23-3
1	Fast Acting	F1	FUSE_20X5
1	FQPF27P06	Q3	to220-123-v
1	HEADER-1X2	CN2	HEADER-1X2
1	KBU6K-E4/51	D2	VISHAY_KBU
1	L7812	IC2	to220-123-v
1	L79L09	IC1	TO-92
1	LM393	IC6	SOIC127P600X175-8AN
1	MBR10100F	D6	to220-13-v
1	NC	C24	CAPC1608X90N
1	NC	R32	RESC1608N_ZERO
1	NE555D	IC3	SOIC127P600X175-8AN
1	SK068-37.5	HT1	SK068
1	TL072	IC5	SOIC127P600X175-8AN
1	TL431ACDBZR	IC7	SOT23-3
1	TSZZ55/004M	TR1	EI66
1	Varistor	VR1	Varistor_7.62and10mm

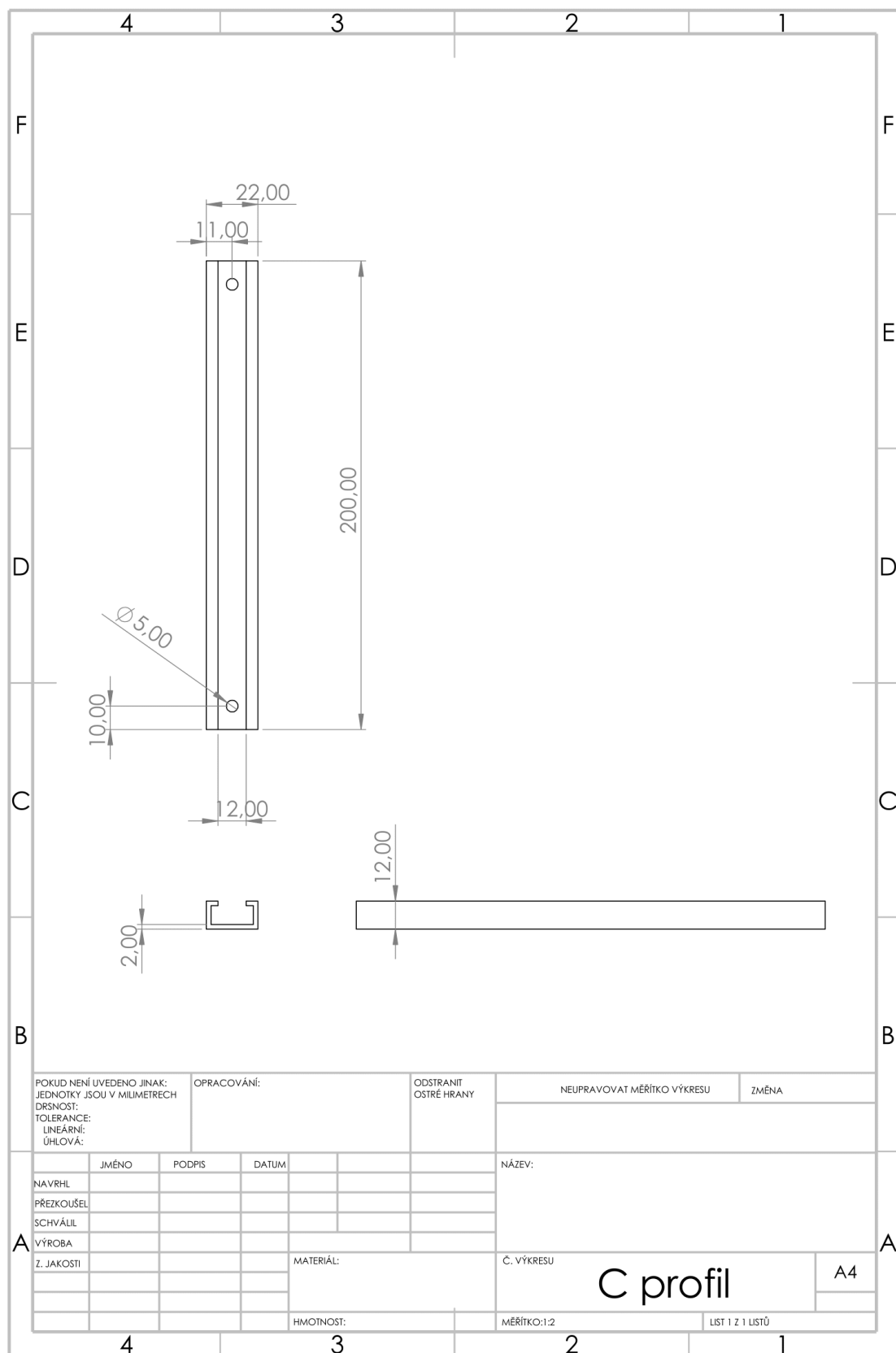
B STROJNÍ VÝKRESY

B.1 Lineární aktuátor (převzato z [20])

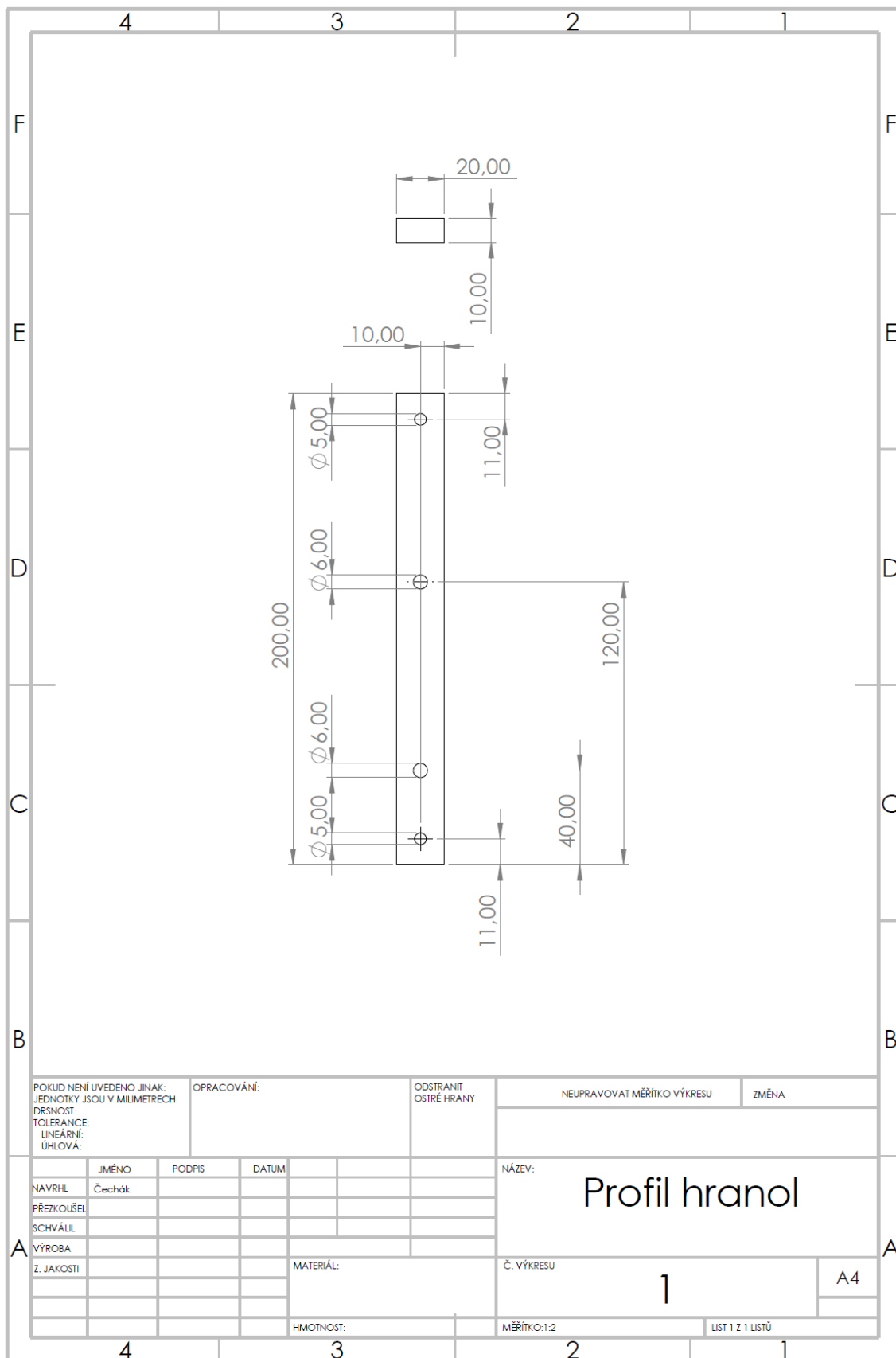
S = 200 mm



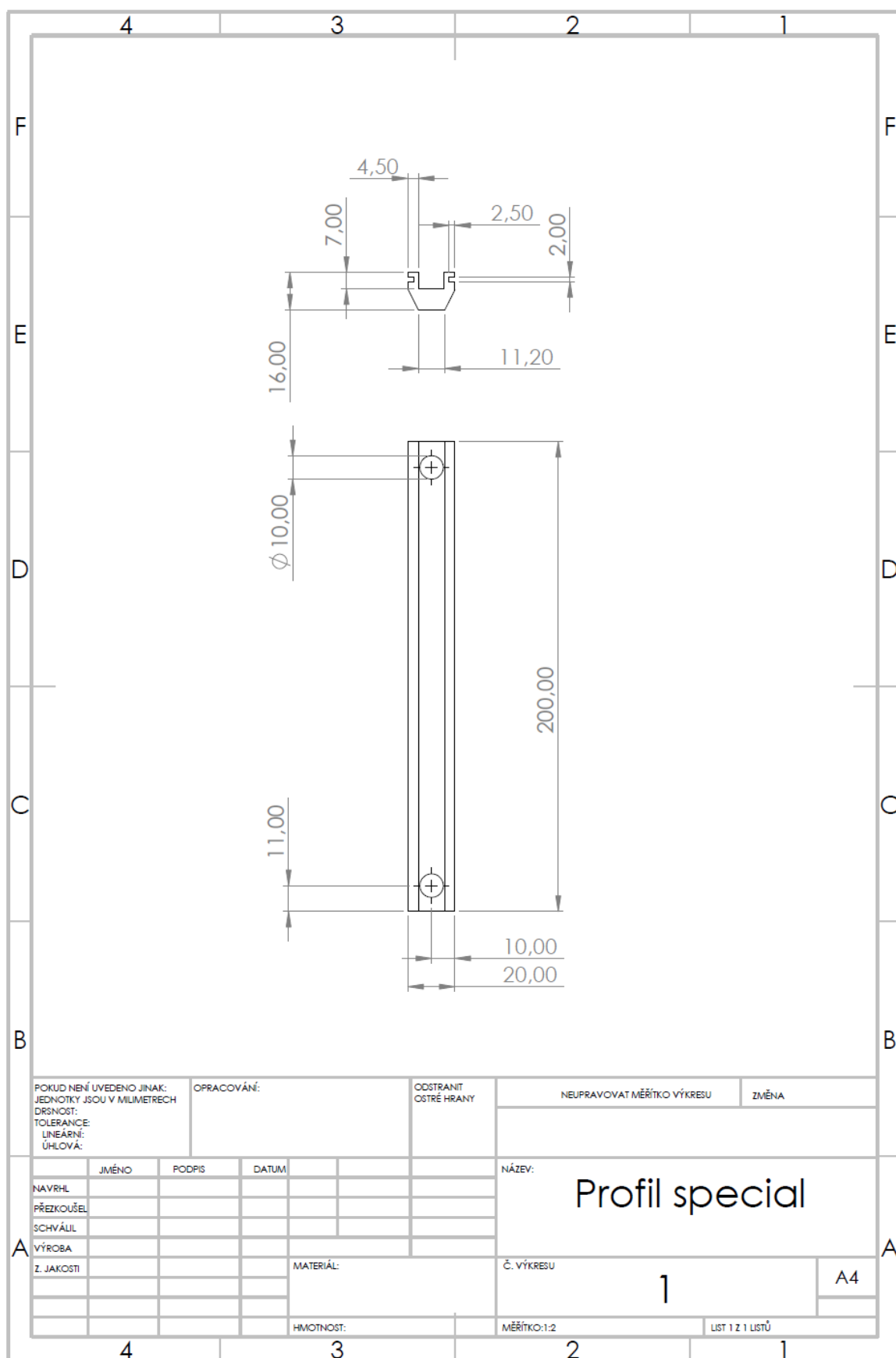
B.2 Hliníkový profil tvaru C



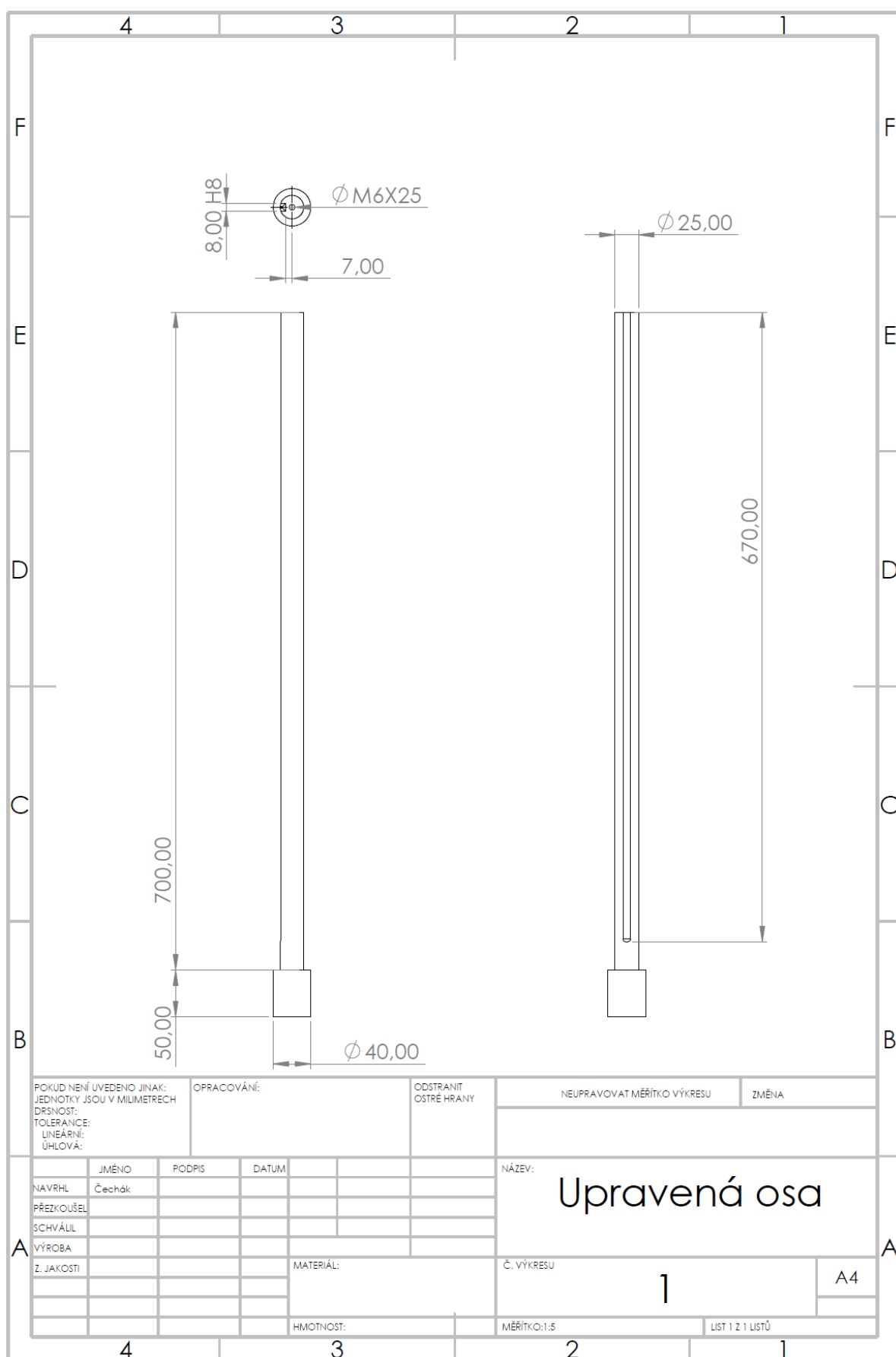
B.3 Hliníkový profil tvaru hranol



B.4 Hliníkový profil – speciální, dodaný firmou SMTplus



B.5 Upravená osa lineárního posuvu



B.6 Svěrák lineárního vedení

